



Conception d'une architecture robuste pour l'acquisition de grandeurs physiques dans un système aéronautique critique : application à la mesure de température, pression, couple, et vitesse d'une turbomachine

Romain Martin

► To cite this version:

Romain Martin. Conception d'une architecture robuste pour l'acquisition de grandeurs physiques dans un système aéronautique critique : application à la mesure de température, pression, couple, et vitesse d'une turbomachine. Electronique. Université de Bordeaux, 2015. Français. NNT : 2015BORD0060 . tel-01249592

HAL Id: tel-01249592

<https://theses.hal.science/tel-01249592>

Submitted on 5 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SPI 209

SPÉCIALITÉ Électronique

Par Romain MARTIN

**Conception d'une architecture robuste pour l'acquisition de
grandeurs physiques dans un système aéronautique critique**

**Application à la mesure de température, pression, couple, et vitesse d'une
turbomachine**

Sous la direction de : Pascal FOUILLAT
(Co-encadrant : Renaud BRIAND)

Soutenue le vendredi 03 avril 2015

Membres du jury :

M. DALLET, Dominique	Professeur, IMS	Président
M. GARDA, Patrick	Professeur, LIP6	Rapporteur
M. SIMEU, Emmanuel	Maître de Conférence, TIMA	Rapporteur
Mme SUBIAS, Audine	Maître de Conférences, LAAS	Examineur
M. BENABES, Philippe	Professeur, Supélec	Examineur
M. FOUILLAT, Pascal	Professeur IMS	Directeur de thèse
M. BRIAND, Renaud	Enseignant-chercheur, ESTIA	Co-encadrant de thèse
M. TERRASSON, Guillaume	Enseignant-chercheur, ESTIA	Co-encadrant de thèse
M. GATTI, Marc	Directeur R&T, Thales	Responsable industriel
M. GUERINEAU, Olivier	Ingénieur Thales	Responsable industriel

Remerciements

Mes sincères remerciements vont bien évidemment à mes encadrants de thèse, MM. Pascal FOUILLAT, Renaud BRIAND, Guillaume TERRASSON, Marc GATTI et Olivier GUERINEAU dont les compétences, leur bonne humeur et leur implication ont très largement contribué à la réussite de cette thèse de doctorat. Cette formidable expérience m'a permis d'acquérir à la fois des compétences techniques dans plusieurs domaines scientifiques innovants et d'actualité, ainsi qu'un plus grand recul face aux problématiques professionnelles et personnelles.

Je remercie également tous les membres de mon jury MM. Dominique DALLET, Patrick GARDA, Emmanuel SIMEU, Audine SUBIAS et Philippe BENABES d'avoir accepté de consacrer du temps à l'évaluation de ces travaux de thèse, ainsi que pour la pertinence de leurs questions et de leurs remarques.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de mes collègues de THALES Systèmes Aéroportés, et tout particulièrement au Centre de Compétences Calculateurs, ainsi qu'aux membres d'ESTIA-Recherche et de l'IMS.

J'adresse également un grand merci aux Professeurs Franck CAZARAUNG, Jean-Luc LACHAUD, Francis RODES et Octavian CUREA pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté. Ainsi qu'Ivan ESTEVEZ et de nombreux collègues de THALES dont je ne peux citer les noms ici.

Je remercie également la *Dream-Team* du Bureau 205 pour l'ambiance (absolument) unique, ainsi que la perpétuelle bonne humeur de *Blanche Neige et des 6 nains*. Je salue également mes coéquipiers de tennis et de volley-ball ainsi que toutes les personnes que j'ai pu côtoyer durant ces quelques années! Enfin je remercie ces personnes dont le talent m'a accompagné sans le savoir durant cette thèse, Joe HISAISHI, Hans ZIMMER, Jeremy SOULE, John WILLIAMS, Jesper KYD ainsi que *Nightwish*, *Blackmill* et *Eminem*.

Je remercie enfin ma famille et mes plus proches amis pour leur inconditionnel soutien et les brillantes remarques qu'ils m'ont adressé plus d'une fois. Je leur présente également toutes mes excuses de n'avoir pas été plus disponible durant la fin de la thèse, mais je pense qu'ils ne m'en voudront pas (-;

« *La pierre précieuse ne peut être polie sans subir de frottements et l'homme ne peut s'accomplir sans subir d'épreuves* » – Pensée bouddhiste

Conception d'une architecture robuste pour l'acquisition de grandeurs physiques dans un système aéronautique critique

L'acquisition de paramètres physiques tels que la température, la pression, le couple et la vitesse est nécessaire aux systèmes aéronautiques critiques afin d'atteindre et d'assurer les performances requises de disponibilité et de sécurité de fonctionnement. L'acquisition de ces paramètres physiques nécessite donc la mise en œuvre de technologies et de techniques hautement éprouvées pouvant supporter les conditions de fonctionnement sévères.

L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est de proposer une nouvelle architecture de chaîne d'acquisition de grandeurs physiques pour être intégrée à un système aéronautique critique. Le but de cette architecture est d'améliorer l'intégrité des données mesurées tout en maintenant leur disponibilité et le niveau de sûreté de fonctionnement propre aux systèmes aéronautiques de haute criticité. La solution se déploie sous la forme d'une amélioration de la tolérance aux défauts de la chaîne de traitement du signal issu du capteur. Pour ce faire, nous intégrons des fonctions supplémentaires, dont le modèle mathématique de la chaîne d'acquisition, rendant ainsi le système plus intelligent.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous appuyons sur les spécifications techniques d'un projet industriel typique des systèmes aéronautiques critiques, qui est le cœur de notre thématique principale.

Mots clés : architecture, tolérance aux défauts, disponibilité, intégrité, sûreté de fonctionnement, système critique, aéronautique, algorithmes génétiques, SWaP, capteur intelligent

Design of an Architecture for Measurement and Diagnosis of Physical Parameters in Critical Airborne Systems

The acquisition of physical parameters as such as temperature, pressure, torque, and speed are necessary to flight critical systems in order to reach and ensure safety and availability required. Consequently, it requires implementing high technologies and techniques which are able to work in rugged environments.

The aim of our work is to design a new architecture for sensor acquisition systems in order to be integrated onto a flight critical system. The goal of the architecture is to ensure data integrity, system's availability and safety relative to airborne critical systems. The solution adds the fault tolerance ability to the signal conditioning. Consequently, we implement additional functionalities, as such as mathematical model of the signal conditioning, in order to make the acquisition system more intelligent.

Our research work is partially based on technical specifications from SYRENA project, which is a typical example of flight critical systems, which is the main thematic of our purpose.

Keywords : architecture, fault tolerance, availability, integrity, safety, critical system, airborne, genetic algorithms, SWaP, intelligent sensor

Unité de recherche

Laboratoire de l'Intégration, du Matériau au Système (IMS)
UMR 5218

351 cours de la libération
F-33405 TALENCE
FRANCE

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Les chaînes capteurs au sein des systèmes aéronautiques critiques.....	3
A. Introduction.....	4
B. Les systèmes aéronautiques critiques.....	4
B.1. Définition et exemples	4
B.2. Les enjeux de la criticité dans l'aéronautique	5
B.3. Solutions actuelles et évolutions technologiques	13
B.4. Synthèse	17
C. Les chaînes d'acquisition de grandeurs physiques.....	18
C.1. Introduction.....	18
C.2. Caractérisation	18
C.3. Tendances technologiques et techniques	23
C.4. Synthèse	25
D. Détection et Diagnostic de défauts	25
D.1. Définition et Terminologie	26
D.2. Classifications des méthodes de détection et de diagnostic de défauts	27
D.3. Critères de désirabilité	30
D.4. Applications à l'aéronautique	31
D.5. Synthèse	33
E. Conclusion	34
II. Chaîne d'acquisition robuste.....	35
A. Introduction.....	36
B. Chaîne d'Acquisition Capteur comme Système Aéronautique Critique	36
B.1. Le contexte SYRENA	36
B.2. Besoins et contraintes	37
B.3. Synthèse	39
C. Défauts ciblés	39
C.1. Rappels des défauts dans une CAC	39
C.2. Sélection des défauts à cibler	40
C.3. Synthèse	47
D. Architecture proposée	47
D.1. Architecture tolérante aux défauts	47
D.2. Chaîne d'Acquisition Capteur (CAC)	48
D.3. Fonction de détection de défauts	48

D.4.	Fonction d'identification de défauts	51
V.	Fonction de gestion de modes	52
VI.	Synthèse	52
E.	Modes de fonctionnement.....	53
E.1.	Mode opérationnel.....	53
E.2.	Mode autotest.....	54
E.3.	Mode d'identification de défauts.....	54
E.4.	Gestion des modes de fonctionnement.....	55
F.	Sélection de la fonction de détection et d'identification de défauts.....	56
F.1.	Aperçu de la méthodologie proposée	56
F.2.	Caractérisation de la Chaîne d'Acquisition Capteur	56
F.3.	Identification des critères d'évaluation des méthodes de détection et de diagnostic.....	57
F.4.	Quantification des critères d'évaluation	58
F.5.	Synthèse des résultats obtenus.....	58
F.6.	Mise en application du processus	59
VII.	Synthèse	62
III.	Implémentation et réalisation.....	63
A.	Introduction.....	64
B.	Fonction de détection de défauts	64
B.1.	Principe mis en œuvre.....	64
B.2.	Moyen d'injection du signal de référence.....	66
B.3.	Moyen de détection de défauts	67
B.4.	Synthèse	69
C.	Fonction d'identification par les Algorithmes Génétiques.....	69
C.1.	Sélection des Algorithmes Génétiques.....	69
C.2.	Principes généraux des Algorithmes Génétiques.....	70
C.3.	Mise en œuvre.....	74
C.4.	Synthèse	78
D.	Mise en œuvre des Modes de Fonctionnement	78
D.1.	Gestionnaire des Modes de fonctionnement	79
D.2.	Mode acquisition.....	81
D.3.	Mode de détection de défauts.....	83
D.4.	Mode d'identification de défauts.....	85

D.5.	Optimisation de la détection de défauts.....	87
E.	Cas d'application	88
E.1.	Présentation de la Chaîne d'Acquisition Capteur mise en œuvre.....	88
E.2.	Modélisation de la fonction inverse.....	93
E.3.	Structure du banc de test.....	95
F.	Synthèse	96
IV.	Validation et résultats expérimentaux.....	98
A.	Réalisation du banc d'essais.....	99
B.	Plan d'expérience	99
B.1.	Réalisation de la CAC instrumentée	100
B.2.	Logiciels du banc de test	106
B.3.	Aperçu du banc de test	110
C.	Résultats expérimentaux.....	110
C.1.	Signaux de test de la CAC instrumentée	110
C.2.	Validation du fonctionnement de la CAC instrumentée	111
C.3.	Expérimentations avec injection des défauts	111
C.4.	Synthèse des résultats.....	117
D.	Perspectives de développement du banc	118
D.1.	Travaux à court termes	118
D.2.	Explications pour le CAN	118
E.	Synthèse	119
	Conclusion et perspectives.....	121
	Bibliographie	123
V.	Annexes	129
A.	Détail des concepts de maintenance	129
A.	Vue d'ensemble des méthodes de détection et de diagnostic de défauts	131
B.	Classification de l'utilisation des méthodes de diagnostic [MAR11].....	132
C.	Architecture du convertisseur A/N de type SAR	133
D.	Table des entrées/sorties du banc d'essais.....	136

Glossaire

Acronymes

Acq	Mode d'acquisition
AFNOR	Association Française de Normalisation
BISR	Banc d'Interface de Système de Régulation
CAC	Chaîne d'Acquisition Capteur
CAT	Catastrophique (niveau de l'effet de la panne)
CdCF	Cahier des Charges Fonctionnelles
CEM	Compatibilité Électromagnétique
CIAME	Commission Interministérielle pour l'Automatisation et la Mesure
COM/MON	COMand and MONitoring
DAL	Design Assurance Level
De	Mode de détection de défauts
EASA	European Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FADEC	Full Authority Digital Engine Control
FC	Fonction de Contrainte
FDD	Fault Detection and Diagnosis
FDI	Fault Detection and Identification
FMEA	Failure Mode Effect and Analysis
FPGA	Field Programmable Gate Array
FS	Fonction de Service
FTA	Fault Tree Analysis
FTC	Fault Tolerant Control
HAZ	Hazardous (niveau de l'effet de la panne)
ICAO	International Civil Aviation Organization
Id	Mode d'identification de défauts
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMA	Integrated Modular Architecture
IVV	Intégration, vérification, validation
LVDS	Low Voltage Differential Signal
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MAJ	Majeur (niveau de l'effet de la panne)
MBU	Multiple Bit Upset
MDT	Mean Down Time
MIN	Mineur (niveau de l'effet de la panne)
MTBF	Mean Time Before Failure
MTTF	Mean Time To Failure
MUT	Mean Up Time (Durée de remise en service)
RPKs	Revenue Passenger Kilometers
RTD	Resistive Temperature Detector
SAR	Successive Approximation Register
SEU	Single Event Upset
SWaP	Size, Weight, and Power
SYRENA	SYstème de REgulation Nouvelle Architecture
T2CAS	Terrain and Traffic Alert and Collision Avoidance System
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet

Symboles

Δ	Dérive de gain de l'amplification
Δ_{adc}	Dérive de gain du CAN
μ	Espérance
D	valeur de commande du potentiomètre numérique
digit _{out}	Valeur numérique en sortie du convertisseur analogique-numérique
FS	Valeur pleine échelle en tension du convertisseur analogique-numérique
G_{adc}	Gain du convertisseur analogique-numérique
G_{OA}	Gain de l'étage d'amplification
I_{exc}	Courant d'excitation
K_{fd}	Coefficient de réduction du filtre différentiel
K_{filt}	Coefficient de réduction du filtre simple
N	Nombre de bits du CAN
q_{adc}	Pas de quantification du convertisseur analogique-numérique
$R_{(T)}$	Valeur ohmique de la sonde rtd en fonction de la température
R_0	Résistance nominale de la RTD
R_1	Résistance du pont de Wheatstone
R_3	Résistance du pont de Wheatstone
R_4	Résistance du pont de Wheatstone
R_{AB}	Résistance globale du potentiomètre numérique
R_{check}	Résistance pour la vérification de la présence de la RTD
R_{g1}	Résistance de la boucle de gain de l'étage d'amplification
R_{OA1}	Résistance de contre réaction de l'amplification
R_{OA2}	Résistance de contre réaction de l'amplification
R_{pot}	Résistance du potentiomètre numérique
R_{ref}	Résistance pour la détection d'un court-circuit de la RTD ou de R_{check}
R_{rtd}	la valeur ohmique du capteur de température
R_w	Résistance de contact du potentiomètre numérique
T	Température à mesurer
V_{alim}	Tension d'excitation du pont de Wheatstone
V_{amp}	La tension en sortie de l'amplification
V_m	La tension en sortie du pont d'adaptation
V_n	Tension à la borne négative de l'amplification
V_{off}	Dérive d'offset de l'amplification
V_{offadc}	Tension d'offset du convertisseur analogique-numérique
V_{offOA}	Tension d'offset de l'étage d'amplification
V_{out}	Tension en sortie de l'amplification
V_{out_OA}	Tension de sortie de l'étage d'amplification
V_p	Tension à la borne positive de l'amplification
X	Variable aléatoire
α	Coefficient de température de la RTD
σ_x	Ecart type

Table des illustrations

Figure 0-1. Augmentation du trafic aérien en fonction des années [AI 12]	1
Figure 0-2. Programmes cadres : Budgets pour l'aéronautique [EC 10]	1
Figure I-1. Niveaux de criticité	5
Figure I-2. Des défauts jusqu'à la panne	6
Figure I-3. Caractérisation des défaillances [AVI 01]	6
Figure I-4. Classification élémentaire des défauts [AVI 01]	7
Figure I-5. Eléments de la Sûreté de fonctionnement.	8
Figure I-6. Niveau de criticité des systèmes aéronautiques en fonction des exigences d'intégrité et de disponibilité [MOR 11]	10
Figure I-7. Processus de conception.....	11
Figure I-8. Les bases d'un système sûr [MOR 11]	12
Figure I-9. Définition graphique du MTTF, MDT, MUT et MTBF [ZWI 95]	12
Figure I-10. Diagramme des différents concepts de maintenance [ZWI 95]	13
Figure I-11. Types d'architectures en fonction de la sûreté requise [MOR 11].....	14
Figure I-12. Redondances physiques double et triple	14
Figure I-13. Redondances doubles et quadruples -doublées	15
Figure I-14. Combinaison de deux chaînes dissymétrique en DAL-B pour atteindre un niveau de sûreté DAL-A	16
Figure I-15. Chaîne d'énergie d'une boucle de régulation moteur	18
Figure I-16 Principe d'un capteur	19
Figure I-17 Principe fonctionnel d'un bloc de conditionnement	20
Figure I-18 Fonctionnalités d'un conditionneur de signal électrique	20
Figure I-19 Principe fonctionnel d'un bloc amplificateur	21
Figure I-20 Principe fonctionnel d'un bloc de filtrage	21
Figure I-21 Principe fonctionnel d'un échantillonneur-bloqueur	22
Figure I-22 Principe fonctionnel d'un convertisseur analogique-numérique	22
Figure I-23. Classification des défauts d'une chaîne d'acquisition.....	23
Figure I-24. Du capteur basique au capteur intelligent [BAY 05]	25
Figure I-25. Illustration de la détection de défauts jusqu'à la supervision	26
Figure I-26 . Intégration d'une fonction de détection et de diagnostic de défauts [ISE 05]	27
Figure I-27. Vue d'ensemble des méthodes de détection de défauts [ISE 05]	28
Figure I-28. Vue d'ensemble des méthodes de diagnostic de défauts [ISE 05]	28
Figure I-29. Classification de l'utilisation des méthodes de diagnostic [MAR 11]	31
Figure II-1. Objectifs d'innovation du projet SYRENA.....	37
Figure II-2. Classification des défauts d'une chaîne d'acquisition	40
Figure II-3. Processus d'identification des défauts majeurs	41
Figure II-4. Illustration de la CAC simulée sans défauts	41
Figure II-5. Principe d'injection de pannes franches	44
Figure II-6. Etage d'amplification avec dérives paramétriques.....	45
Figure II-7. Etage de numérisation avec dérives paramétriques	45
Figure II-8. Illustration de la CAC simulée avec défauts.....	46
Figure II-9. Nouvelle architecture de Chaîne d'Acquisition Capteur.....	48
Figure II-10. Chaîne d'Acquisition Capteur avec injection de donnée de test	48
Figure II-11. Fonction de détection de défauts	49
Figure II-12. Fonction d'identification de défauts	51

Figure II-13. Fonction de compensation de défauts	52
Figure II-14. Fonction de gestion des modes	52
Figure II-15. Gestion des modes de fonctionnement	53
Figure II-16 Mode Opérationnel	53
Figure II-17. Mode d'Autotest.....	54
Figure II-18. Mode d'Identification.....	55
Figure II-19. Diagramme d'ordonnancement des modes	55
Figure II-20. Aperçu fonctionnel de la méthodologie proposée	56
Figure II-21. Pont de Wheatstone implémenté.....	59
Figure II-22. Importance des critères du cas d'application.....	61
Figure III-1. Aperçu fonctionnel de l'architecture proposée	64
Figure III-2. Principe initial de la détection de défaut	65
Figure III-3. Schéma de commutateur commandable	66
Figure III-4. Principe de la génération de résidus	67
Figure III-5. Principe de la fonction de décision.....	68
Figure III-6. Comparaison des seuils fixes (à gauche) et adaptatifs (à droite).....	68
Figure III-7. Procédure standard d'algorithme génétique canonique [CAO 99]	70
Figure III-8. Processus de génération de nouvelle population	71
Figure III-9. Exemple de génération de population	72
Figure III-10. Processus d'évaluation	72
Figure III-11. Processus standard de génération de nouvelle population	73
Figure III-12. Loi normale de distribution pour la génération de paramètres.....	76
Figure III-13. Processus d'évaluation	76
Figure III-14. Couples de test pour la fonction de coût	77
Figure III-15. Diagramme fonctionnel de la CAC proposée.....	79
Figure III-16. Exemple de la gestion des modes de fonctionnement	80
Figure III-17. Fonctionnement du mode d'Acquisition.....	81
Figure III-18. Activation du mode d'acquisition avec et sans la compensation	82
Figure III-19. Fonction de compensation	83
Figure III-20. Architecture du mode de détection de défauts	84
Figure III-21. Mode de détection de défauts	84
Figure III-22. Fonctionnement du mode de détection de défauts	85
Figure III-23. Mode d'identification des défauts.....	86
Figure III-24. Fonctionnement du mode d'identification de défauts	87
Figure III-25. Principe de la détection de défauts	87
Figure III-26. Mode de détection des nouveaux défauts.....	88
Figure III-27. Schéma fonctionnel du cas d'application à la température	89
Figure III-28. Schéma électrique d'un pont de Wheatstone	90
Figure III-29. Représentation des contraintes de la plage de sortie de la CAC	90
Figure III-30. Conception d'un filtre différentiel (3 étapes)	91
Figure III-31. Ecart en bit pour une variation de 2°C	95
Figure III-32. Représentation fonctionnelle du banc de test	96
Figure IV-1. Schéma du banc de test avec mécanismes d'injection de défauts	100
Figure IV-2. Commutateur inter-bloc fonctionnels.....	101
Figure IV-3. Photo de la CAC instrumentée	102
Figure IV-4. Illustration de l'injection des défauts sur l'étage d'amplification.....	103
Figure IV-5. Illustration de l'injection de la dérive d'offset sur l'étage de conversion.....	104
Figure IV-6. Illustration d'une résistance équivalente du pont de Wheatstone.....	104
Figure IV-7. Configurations du pont de Wheatstone	105

Figure IV-8. Machine d'états de la gestion des modes et du test	107
Figure IV-9. Schématique du prototypage HIL	108
Figure IV-10. Schématique du prototypage de contrôle rapide	109
Figure IV-11. Aperçu du banc de test	110
Figure IV-12. Valeurs des sorties de références	111
Figure IV-13. Sorties de référence pour la dérive de gain	112
Figure IV-14. Comparaison des sorties estimées et des sorties calculées pour la dérive de gain	112
Figure IV-15. Comparaison de l'évolution des paramètres pour la dérive de gain	113
Figure IV-16. Sorties de référence pour la dérive d'offset	114
Figure IV-17. Comparaison des sorties estimées et des sorties calculées pour la dérive d'offset	114
Figure IV-18. Comparaison de l'évolution des paramètres pour la dérive d'offset	115
Figure IV-19. Sorties de référence pour les dérives de gain et d'offset	116
Figure IV-20. Comparaison des sorties estimées et des sorties calculées pour les dérives de gain et d'offset	116
Figure IV-21. Comparaison de l'évolution des paramètres pour la dérive de gain et d'offset	117
Figure V-1. Diagramme des différents concepts de maintenance [ZWI 95]	129
Figure V-2. Architecture du convertisseur analogique-numérique de type SAR	133
Figure V-3. Architecture de l'étage de conversion numérique-analogique	134
Figure V-4. Architecture de l'étage de conversion A/N par approximations successives.....	135

Liste des tableaux

Tableau I-1. Effets des types de défaillance [MOR 11]	9
Tableau I-2 Grandeurs physiques exploitées	18
Tableau I-3 . Comparaison de méthodes de diagnostic en fonction de critères de désirabilité [DAS 00]	31
Tableau II-1. Table de symboles des équations	42
Tableau II-2. Identification des défaillances simulées	44
Tableau II-3. Synthèse des avantages et des inconvénients des moyens d'injection identifiés	50
Tableau II-4. Tableau de critères d'évaluation de fonction de diagnostic	57
Tableau III-1. Comparatif des données à injecter	66
Tableau III-2. Méthodes de sélection	73
Tableau III-3. Synthèse de l'activation des signaux en fonction de l'état de la CAC.....	80
Tableau III-4. Impact des défauts francs du pont sur le signal de sortie.....	90
Tableau IV-1. Configuration des commutateurs en fonction du mode de fonctionnement ...	106
Tableau IV-2. Exploitation des programmes en fonction du prototypage	109

Introduction générale

Depuis plusieurs dizaines d'années, le monde de l'aéronautique est en perpétuelle évolution et cela ne va cesser de continuer. En effet, lors des vingt prochaines années, il a été démontré par de nombreuses études de marchés [AI 12], [EC 10] réalisées par divers acteurs de l'aéronautique que le nombre de personnes voyageant en avion, qui est aujourd'hui estimé à un demi-million de passagers, va être multiplié par un facteur de 2,5. La Figure 0-1 illustre cette intensification quasi-exponentielle du trafic aérien qui tend à doubler tous les 15 ans, avec RPKs exprimant revenu par passager par kilomètres parcourus.

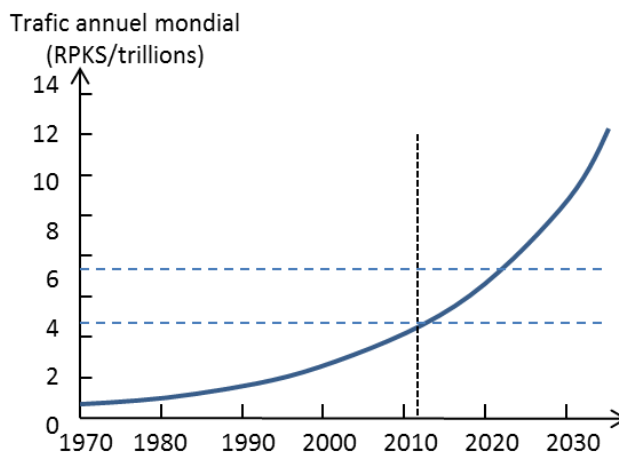


Figure 0-1. Augmentation du trafic aérien en fonction des années [AI 12]

La seconde tendance majeure de cette évolution est relative aux systèmes plus « verts ». En effet, de nombreux appels à projets ont été lancés par les organismes internationaux, tels que la Commission Européenne, pour l'aéronautique. La Figure 0-2 présente les programmes de financement européens et l'augmentation conséquente des investissements réalisés. De la même manière que les programmes de recherche précédents, les futurs appels à projet et notamment les projets H2020 gardent cette même tendance et laissent eux aussi une part dominante aux investissements liés aux technologies « vertes ».

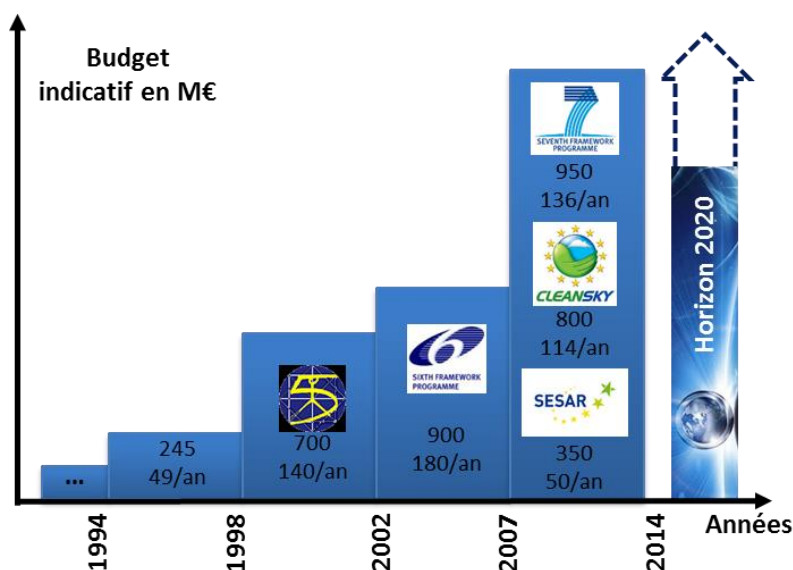


Figure 0-2. Programmes cadres : Budgets pour l'aéronautique [EC 10]

Par conséquent, dans le contexte industriel de l'aéronautique où les exigences environnementales et les coûts sont de plus en plus élevés, il est nécessaire de se poser la question suivante: «En tenant compte de l'évolution des exigences de navigabilité des équipements ainsi que des tendances technologiques, comment peut-on assurer un niveau de sûreté de fonctionnement suffisant dans des systèmes qui tendent à se réduire en termes de volume, de poids et de consommation énergétique? »

Partant de ce constat, le premier chapitre décrit le contexte de notre étude. En premier lieu, nous présentons les systèmes aéronautiques critiques, le rôle des capteurs dans ces systèmes et leurs enjeux techniques et technologiques. Ceux-ci s'expriment notamment par l'amélioration des systèmes assurant la sûreté de vol, ainsi que la nécessité de trouver une alternative à la redondance physique habituellement utilisée pour y remédier. Par la suite, nous détaillons le fonctionnement des chaînes d'acquisition de grandeurs physiques à travers leurs caractéristiques et les tendances techniques et technologiques actuelles. Enfin, nous présentons un état de l'art comparatif des moyens de détection et de diagnostic de défauts appliqués à différents domaines d'application.

Les trois chapitres suivants sont dédiés à la conception de la nouvelle l'architecture de chaîne d'acquisition, à partir de l'identification des solutions que l'on peut mettre en œuvre, jusqu'à la validation de l'architecture par expérimentation.

Le second chapitre présente la solution vers laquelle nous nous orientons, à partir des spécifications d'une chaîne d'acquisition et de nos objectifs (disponibilité, intégrité de la donnée, et sûreté de fonctionnement). Nous y décrivons l'architecture ainsi que l'ensemble des modes nécessaires à son fonctionnement, puis un processus de sélection des moyens de détection et d'identification de défauts.

Le troisième chapitre détaille nos contributions au sein de cette nouvelle architecture. D'abord par l'optimisation des fonctions de détection et d'identification de défauts, cette dernière exploitant des algorithmes génétiques. Puis par l'utilisation des modes de fonctionnement selon un séquençement donné: acquisition, détection, identification, et compensation. Enfin, nous définissons le modèle mathématique de notre chaîne d'acquisition capteur.

Le quatrième chapitre vise à valider notre contribution par expérimentation. Pour valider notre architecture, nous y développons un banc d'essais et établissons le plan d'expériences permettant de calibrer et de valider cette architecture. Finalement, nous commentons les résultats obtenus et présentons des perspectives de développement du banc d'essais.

Ce manuscrit conclura sur notre contribution et les nombreuses perspectives de recherche et de développement qui pourraient en découler.

Chapitre I - Les chaînes capteurs au sein des systèmes aéronautiques critiques

A.	Introduction.....	4
B.	Les systèmes aéronautiques critiques.....	4
B.1.	Définition et exemples	4
B.2.	Les enjeux de la criticité dans l'aéronautique	5
B.3.	Solutions actuelles et évolutions technologiques	13
B.4.	Synthèse	17
C.	Les chaînes d'acquisition de grandeurs physiques.....	18
C.1.	Introduction.....	18
C.2.	Caractérisation	18
C.3.	Tendances technologiques et techniques	23
C.4.	Synthèse	25
D.	Détection et Diagnostic de défauts	25
D.1.	Définition et Terminologie	26
D.2.	Classifications des méthodes de détection et de diagnostic de défauts	27
D.3.	Critères de désirabilité	30
D.4.	Applications à l'aéronautique	31
D.5.	Synthèse	33
E.	Conclusion	34

A. Introduction

Aujourd'hui, le contexte du monde aéronautique démontre l'accroissement constant du trafic aérien et de ses multiples conséquences sur l'économie et la sûreté des vols. Depuis plusieurs décennies, il existe une volonté croissante d'anticiper l'évolution de la technologie et la coordination avec les besoins de flux de passagers, de marchandises, et d'information de plus en plus denses. Dès lors, le contexte actuel impacte déjà sur les réflexions menées autour de la conception du futur des systèmes aéronautiques critiques, ce qui induit une évolution de leurs architectures. Parmi ces systèmes aéronautiques critiques, nous allons nous focaliser plus particulièrement sur les systèmes de régulation de turbomachines et notamment sur les chaînes capteurs qui leur donnent la capacité d'agir en fonction des données sur leur environnement proche. L'objectif de nos travaux est, dans ce contexte, de proposer des solutions afin d'améliorer l'intégrité et la disponibilité de Chaînes d'Acquisition Capteur (CAC) aéronautiques critiques, en coordination avec les tendances techniques et technologiques, ainsi que les exigences de sûreté définies par les besoins du marché....

A cet égard, dans un premier temps, nous allons définir ce qu'est un système aéronautique critique, puis nous présenterons ce qu'est une chaîne d'acquisition de grandeurs physiques dans le contexte aéronautique. Cette étude s'appuie fortement sur la notion de sûreté de fonctionnement. Par la suite, nous établirons un état de l'art de l'ensemble des travaux menés et des pistes à explorer pour garantir l'intégrité, la disponibilité, et la fiabilité de ces chaînes d'acquisition de systèmes aéronautiques critiques.

B. Les systèmes aéronautiques critiques

B.1. Définition et exemples

Un système aéronautique se définit par une entité capable de se mouvoir dans les airs de façon autonome (avion, hélicoptère, drone), a contrario des entités se mouvant grâce aux courants aériens (montgolfière, planeur, sonde météorologique). Un système est défini comme critique dès lors qu'une panne de celui-ci peut avoir des conséquences dramatiques, tels des morts ou des blessés, des dommages matériels importants, ou des conséquences graves pour l'environnement. Par exemple, le système de freinage d'un véhicule automobile est considéré comme critique.

Par déduction, un système aéronautique critique est caractérisé par les deux catégories précédemment décrites. Ainsi, un système aéronautique critique est qualifié comme tel dès lors qu'un dysfonctionnement de celui-ci peut avoir des conséquences dramatiques sur la sécurité de l'équipage et des passagers, à bord de tout aéronef. Au sein d'un aéronef, ces systèmes critiques sont nombreux et concernent les systèmes suivants :

- Calculateur de Contrôle moteur (ex : turbomachine, train d'atterrissage, etc.) ;
- Commandes de vol (ex : gouvernes de profondeur, aileron, etc.) ;
- Contrôles de puissance auxiliaires (ex : turbogénérateur) ;
- Contrôle de l'environnement (ex : température cabine, etc.) ;
- Affichage du cockpit (ex : affichage des informations de navigation, affichage des alarmes liées à des pannes, etc.).

B.2. Les enjeux de la criticité dans l'aéronautique

B.2.1. Niveaux de criticité

Dans le milieu industriel, il est impératif de connaître le niveau de criticité des systèmes à concevoir pour plusieurs motifs. En premier lieu, le niveau de criticité adresse l'importance de la sûreté de fonctionnement du système à élaborer, et par conséquent le niveau de fiabilité global à assurer lors de son exploitation. En second lieu, le niveau de fiabilité impacte directement l'ensemble de la durée de vie du système de sa conception en bureau d'études, jusqu'à son exploitation par l'utilisateur final. De ce fait, les organismes internationaux de normalisation ont défini des standards stricts, les industries ont développé des processus de conception génériques, et les utilisateurs finaux assurent un suivi rigoureux des systèmes concernés.

Le niveau de criticité d'un système aéronautique est dépendant des événements que son dysfonctionnement peut entraîner sur la sécurité de l'équipage et des passagers, à bord de tout aéronef. Plus le niveau de criticité d'un système est élevé, plus celui-ci doit être robuste afin d'assurer sa fonction principale tout en faisant face à des perturbations, des défauts et voire des défaillances. Ainsi, la Figure I-1 illustre les niveaux de criticités tels que définis par l'ICAO et mis en application par les organismes américains (FAA) et européens (EASA), responsables de la régulation des opérations de vol. [FAN 10]

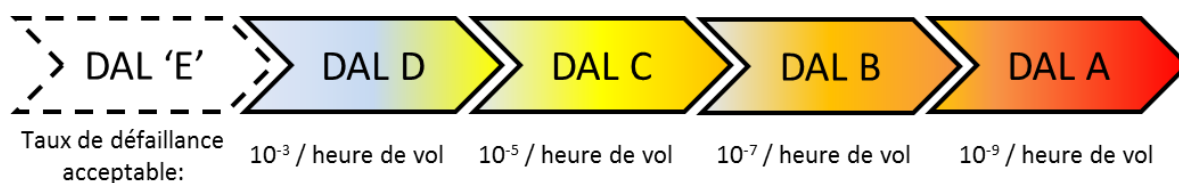


Figure I-1. Niveaux de criticité

Le niveau de criticité de DAL A correspond à une défaillance qui empêche un vol ou un atterrissage sûr.

Le niveau de criticité de DAL B correspond à une défaillance qui réduit fortement la capacité de l'appareil ou l'aptitude de l'équipage à faire face aux conditions opérationnelles de vol. Par exemple: forte réduction des marges de sécurité ou des aptitudes fonctionnelles classiques, stress ou forte surcharge de travail empêchant l'équipage de mener à bien ou correctement son travail, effets collatéraux pouvant blesser sérieusement un certain nombre d'occupants de l'appareil.

Le niveau de criticité de DAL C correspond à une défaillance qui réduit la capacité de l'appareil ou l'aptitude de l'équipage à faire face aux conditions opérationnelles de vol. Par exemple: forte augmentation de la charge de travail de l'équipage, conditions de travail amoindrissant l'efficacité de l'équipage, inconfort des passagers.

Le niveau de criticité de DAL D correspond à une défaillance qui ne réduira pas de manière significative la sûreté de fonctionnement de l'appareil, et les compétences de l'équipage peuvent compenser la charge de travail supplémentaire. Par exemple: faible réduction des marges de sécurité, modification du plan de vol, etc.

Le niveau de criticité de DAL E correspond à une défaillance qui n'affecte pas les capacités opérationnelles de l'appareil ni n'augmente la charge de travail de l'équipage.

L'apparition d'une défaillance, voire d'une panne au sein d'un système aéronautique critique est événementielle mais jamais inévitable. Son phénomène d'apparition se comporte de la même manière que le modèle du fromage à trou [VEH 99] comme l'illustre la Figure I-2. Cette figure démontre les liens entre perturbation, défaut, erreur, défaillance et panne.

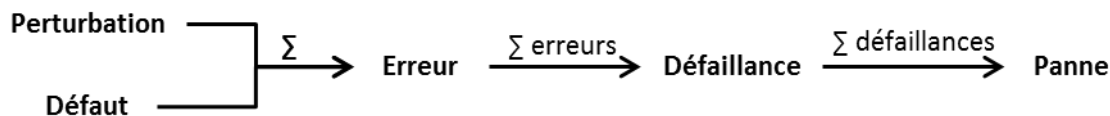


Figure I-2. Des défauts jusqu'à la panne

La **panne** est la conséquence d'une défaillance dont l'état est permanent, elle concerne aussi bien le matériel (ex : circuit électronique hors service, composant abîmé, connectique rompue) que le logiciel (ex : état inconnu, donnée corrompue).

Une **défaillance** correspond à l'incapacité d'un système à accomplir sa fonction dans ses conditions de fonctionnement normales [ZWI 95], elle correspond à un cumul d'erreurs spécifiques à la défaillance. La défaillance se caractérise par son domaine d'effets, ses conséquences, et sa perception du point de vue utilisateur comme l'illustre la Figure I-3 [AVI 01]. Ainsi, le domaine de la défaillance impacte :

- Soit la latence du système (transmission de données, temps de réponse) ;
- Soit les valeurs des données (fiabilité et intégrité des données affectées, état inconnu du système).

Du point de vue utilisateur, dans le « meilleur » des cas la défaillance est perçue comme une information ou un comportement inattendu. Par exemple, une commande qui ne répond plus ou part en butée est rapidement perçue par le pilote. Dans le pire des cas, la défaillance n'est pas directement perceptible par l'opérateur et nécessiterait une analyse plus poussée. Par exemple, une sonde de pression pour l'altimètre qui se dérègle et indique une pression plus faible qu'en réalité (et donc une altitude trop élevée).

Nous détaillons les conséquences sur l'environnement en termes de criticité un peu plus loin, où les niveaux de criticités dans le domaine aéronautique servent de points de références.



Figure I-3. Caractérisation des défaillances [AVI 01]

Une **erreur** correspond à un dysfonctionnement ponctuel d'une fonction ou à la modification temporaire d'une valeur. Une erreur est provoquée par le cumul de défauts et/ou de perturbations propres à cette erreur. Par exemple, une latence dans le traitement d'une information ou la modification de la valeur d'une donnée.

Les **défauts** et les **perturbations** correspondent à la modification involontaire d'une valeur ou au dérèglement d'un fonctionnement. Nous pouvons différencier les perturbations d'origine externes au système des défauts d'origine interne. Dans le cas d'une **perturbation**, ses

origines peuvent être dues à des champs électromagnétiques de systèmes voisins proches ou encore les flux de neutrons émis dans l'interaction des radiations cosmiques avec l'atmosphère et déclenchant des SEU (Single Event Unit) ou des MBU (Multiple Bit Upset) modifiant les niveaux logiques des composants numériques [NOR 04]. Un **défa**ut peut être considéré comme un défaut de fonctionnement propre au système ou à la fonction (ex : mauvaise loi de régulation, informations non synchronisées), ou bien à une utilisation inappropriée au regard des spécifications d'utilisation (ex : erreur humaine). Ainsi, un défaut de fonctionnement se caractérise par un ensemble d'éléments permettant de définir ses origines, ses causes, et les symptômes résultant de ses conséquences et, comme le présente la **Figure I-4**, peut être dû à [AVI 01] :

- des défauts de conception (matériel, logiciel, ou architectural) : mauvaises connectiques, bug dans un programme, modes communs
- des défauts d'utilisation : utilisation au-delà des limites prévues, mauvaises commandes d'entrée
- des limitations du système : latences, performances de calcul trop faibles.

Par exemple, une rupture de connexion est classifiée comme un défaut abrupt, basé sur une valeur (souvent d'origine vibratoire), de nature stochastique (notamment parce que l'état est définitif) et engendre un circuit ouvert. Autre exemple, le vieillissement d'un composant est considéré comme un défaut naissant (puisque progressif), d'origine temporelle (nombre d'heures d'utilisation), de nature périodique (le vieillissement se fait de manière régulière), et a pour conséquence l'évolution non contrôlée des paramètres physiques internes de l'élément (telle qu'une variation ohmique définitive).

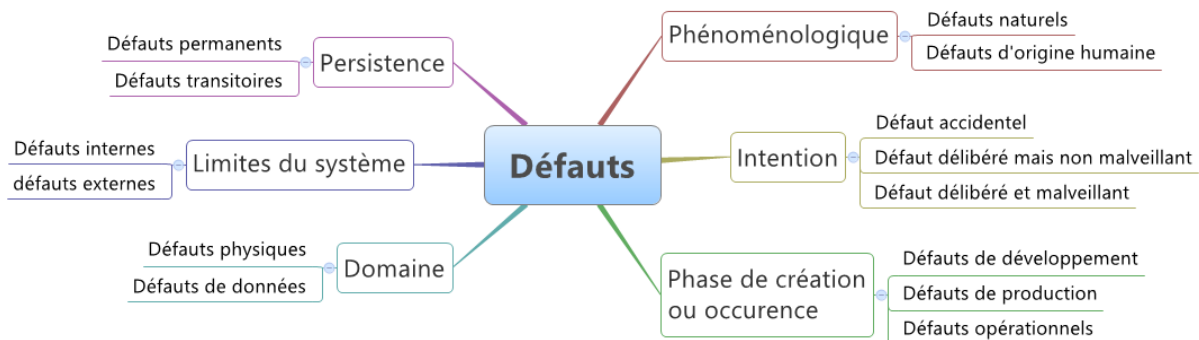


Figure I-4. Classification élémentaire des défauts [AVI 01]

B.2.2. Sûreté de fonctionnement

La **Sûreté de Fonctionnement** est considérée comme une science statistique, qui prend en considération les probabilités d'apparition et les conséquences des défaillances. Elle se caractérise par l'étude statique et dynamique du système ciblé, du point de vue prévisionnel, opérationnel, puis expérimental [ZWI 95]. Elle a pour objectif de faire tendre vers zéro le taux de défaillances d'un système critique, même si dans la réalité le « zéro défaut » ne peut pas être mis en œuvre. Les commissions de normalisation telles que l'AFNOR recensent les exigences de sûreté de fonctionnement pour chaque type de système. Comme le montre la Figure I-5, la sûreté de fonctionnement est généralement composée des trois éléments suivants [ZWI 95] [AVI 01] [LAP 92] :

- Les **menaces** auxquelles le système doit faire face afin d'assurer le niveau de sûreté de fonctionnement requis. Ces menaces sont au nombre de trois : les **défauts** (et les **perturbations**), les **erreurs** et les **défaillances** et ont été défini précédemment.
- Les **attributs** qui constituent des moyens d'évaluation de la sûreté de fonctionnement. Il existe six attributs :
 - La **Fiabilité** qui est l'aptitude d'une entité accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné ;
 - La **Disponibilité** qui est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite ;
 - La **Maintenabilité** qui est l'aptitude d'un système à être entretenu ou remis en marche ;
 - La **Sécurité** qui est l'aptitude d'un système à respecter l'utilisateur et son environnement ;
 - L'**Intégrité** qui est l'absence d'état inconnu du système exposé à des changements ;
 - La **Confidentialité** qui est l'absence de divulgation non autorisée d'informations.
- Les **moyens** qui constituent les solutions à mettre en œuvre pour assurer et améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système donné. Ces moyens se décomposent en quatre catégories :
 - La **prévention des défauts** réalisable grâce à un processus de contrôle qualité mis en œuvre lors de la conception et de la fabrication des ensembles matériels et logiciel du produit,
 - La **tolérance aux défauts** visant à assurer un service correct (au regard des spécifications techniques) du système lors de l'apparition de défauts : cette aptitude s'implémente par des processus de détection d'erreurs (au niveau du code), par la remise en état du système infecté, ou encore par la gestion des défauts (identification et diagnostic),
 - La **suppression des défauts** (ou au moins la diminution) se réalisant durant les phases de développement et les phases opérationnelles du système : cette aptitude correspond à un cycle de vie évoluant entre les phases de vérification de présence de défauts, de diagnostic de ces défauts, et de la correction des défauts, jusqu'à ce qu'aucun défaut ne soit détecté,
 - La **prévision des défauts** tendant à évaluer le comportement du système au vu de l'apparition de défauts : cette évaluation présente deux aspects qui sont l'évaluation qualitative basée sur l'identification et la classification des modes de pannes, et l'évaluation quantitative basée sur les probabilités de défauts des attributs.

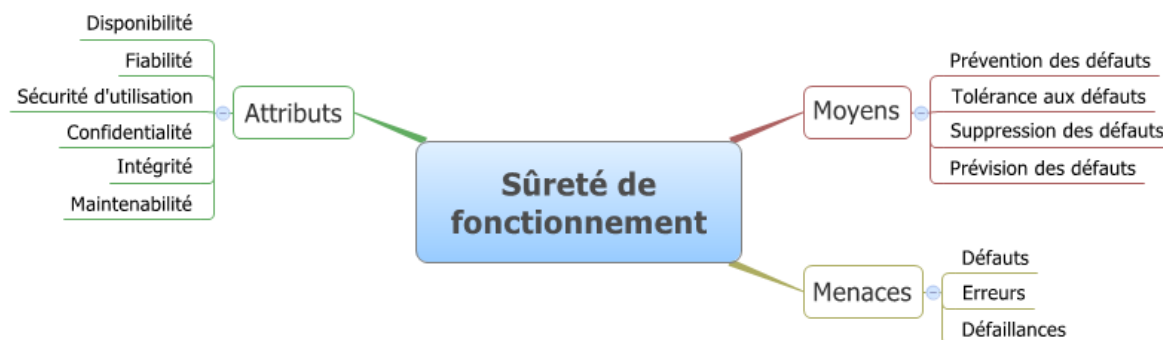


Figure I-5. Éléments de la Sûreté de fonctionnement.

Précédemment, nous avons démontré que le niveau de criticité d'un système aéronautique était dépendant du niveau de sévérité des événements (mineurs, majeurs, dangereux, catastrophiques) pouvant être entraînés par une ou plusieurs défaillances de celui-ci. Dans le cas des événements catastrophiques, et donc d'un système de catégorie DAL-A, l'assurance des niveaux d'intégrité, de disponibilité et de fiabilité du système est la clé de voute de sa sûreté de fonctionnement. Ainsi, le Tableau I-1 illustre les effets de la perte d'intégrité et de disponibilité d'un système aéronautique selon le type de défaillances.

Tableau I-1. Effets des types de défaillance [MOR 11]

Type de défaillance	Perte d'intégrité	Perte de disponibilité
Effet sur le système	Dysfonctionnement du système	Perte de fonctions du système
Causes potentielles	<ul style="list-style-type: none"> - Acquisition erronée des entrées - Erreur de calcul - Erreur de transmission en sortie 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes des entrées et/ou des sorties - Pertes du cœur de processeur, de puissance, etc.
Exemple de conséquences	<ul style="list-style-type: none"> - Affichage erroné - Comportement erroné non attendu - Fausses alertes ou pertes d'alertes - Surface hardover 	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de l'affichage - Perte des alertes - Surface jamming
Moyens de compensation	Vote, comparaison, surveillance continue (watchdog, CRC, etc.)	Redondances, reconfiguration, surveillance continue (rafraîchissement, vérification de validité, etc.)

De plus, nous avons vu que chaque défaillance avait un impact sur la sûreté de fonctionnement et sur un ou plusieurs de ses attributs. La Figure I-6 illustre comment les niveaux d'exigences (mineurs (MIN), majeurs (MAJ), dangereux (HAZ), catastrophiques (CAT)) d'intégrité et de disponibilité ont un impact sur la criticité des systèmes aéronautiques.

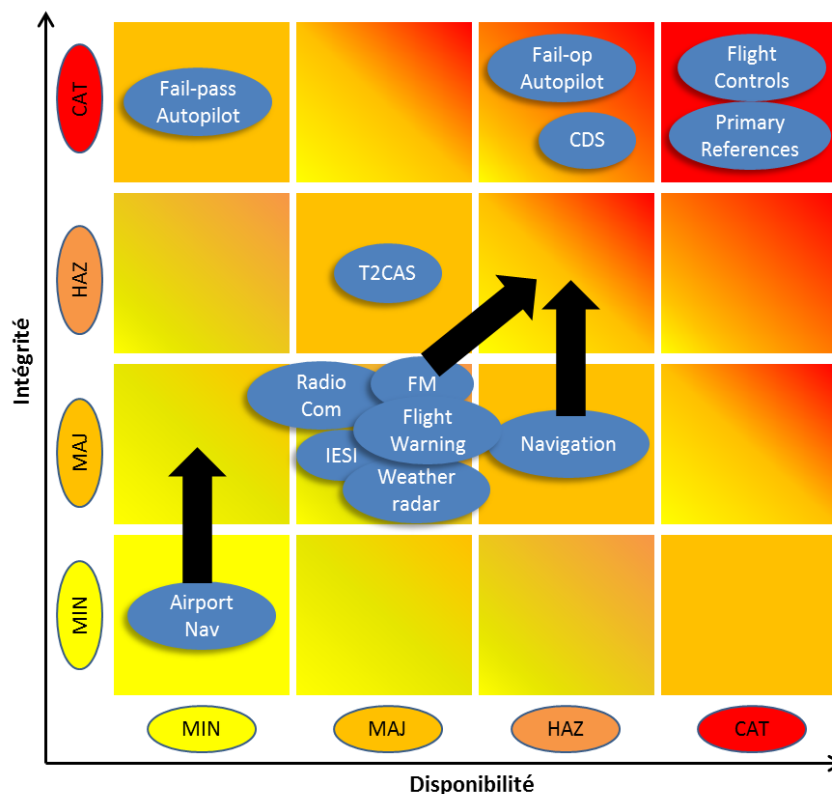


Figure I-6. Niveau de criticité des systèmes aéronautiques en fonction des exigences d'intégrité et de disponibilité [MOR 11]

Ainsi, dans l'objectif de rendre un système navigable, nous avons démontré que l'équipe de conception se doit d'assurer un certain niveau de disponibilité et d'intégrité du système élaboré en fonction de sa criticité.

B.2.3. Conception et maintenance de systèmes aéronautique critiques

Dans ce contexte, il est important de conduire un processus rigoureux pour concevoir, développer et qualifier ces systèmes en vue d'en obtenir leur certification par les autorités civiles ou militaires de navigabilité. Pour ce faire, de nombreuses normes agréées par les agences de la sécurité aérienne telles que la FAA et l'EASA, ont été déployées et permettent de cibler les principales exigences de conception, de développement et de qualification en vue de la certification.

Afin de guider l'équipe de conception, les normes telles que les DO 160-F [RT 97], DO 178-B [RT 92], DO 254 [RT 06], mettent en avant les exigences pour la qualification du produit à concevoir. Par exemple :

- La **DO 160-F** : « *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment* » définit les exigences de tenue environnementale du système telles que la température d'utilisation, les niveaux de vibrations, poussières, CEM, SEU, etc.),
- La **DO 178-B** : « *Software considerations in airborne systems and equipment certification* » définit les règles de conception, de développement et de test applicables aux logiciels critiques embarqués selon des niveaux de DAL (Design Assurance Level correspondant à la criticité de la solution,

- La **DO 254** : « *Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware* » est le pendant de la DO178 pour la conception, le développement et le test de fonctions matérielles critiques,
- L'**ARP 4761**: « *Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment* » [SA 96] est une forte recommandation (donc pas un standard officiel) visant à faciliter la classification des conditions de pannes d'une fonction embarquée (en aéronautique),
- L'**ARP 4754**: « *Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems* » [SA 96] est un standard permettant d'allouer le niveau de DAL au sein du système, au niveau logiciel ou au niveau matériel.

Ainsi, du point de vue industriel, la mise en place d'un processus de conception standard permet de répondre partiellement aux exigences de ces normes. Le processus de conception standard se compose de cinq grands axes, tels que présentés dans l'ordre par la Figure I-7. **L'orientation** permet de définir le besoin fonctionnel et le cycle de vie du produit, pour les analyser. L'étape de **conception** vise à formaliser les exigences, à construire l'architecture et à planifier l'IVV. L'étape de **développement** permet d'élaborer une version préliminaire de la solution, de finaliser la définition de la solution, et d'organiser l'IVV. L'étape **d'intégration et de vérification** vise à intégrer, vérifier, et valider la définition de la solution proposée. Enfin, l'étape de **validation** tend à accepter la solution proposée, et à qualifier la solution et le processus de production.



Figure I-7. Processus de conception

De plus, afin de faciliter la « certificabilité » du système élaboré, les concepteurs de systèmes critiques (et complexes) ont défini les bases d'un système sûr, dans le but d'identifier et de quantifier les causes les plus probables de défaillance. Un système sûr est un système qui se retrouvera dans un état prévisible lors de l'apparition d'une défaillance. Il distingue deux familles de pannes: les **pannes passives** où le système est désactivé dès l'apparition d'une défaillance, et les **pannes actives** où le système demeure opérationnel malgré l'apparition d'une défaillance. Un système sûr doit prendre en compte trois points lors du processus de conception : la fiabilité des ressources matérielles et logicielles, la robustesse du design, et la sûreté de l'architecture mise en œuvre. La Figure I-8 illustre chacun de ces trois points et définit par l'exemple leurs spécificités.

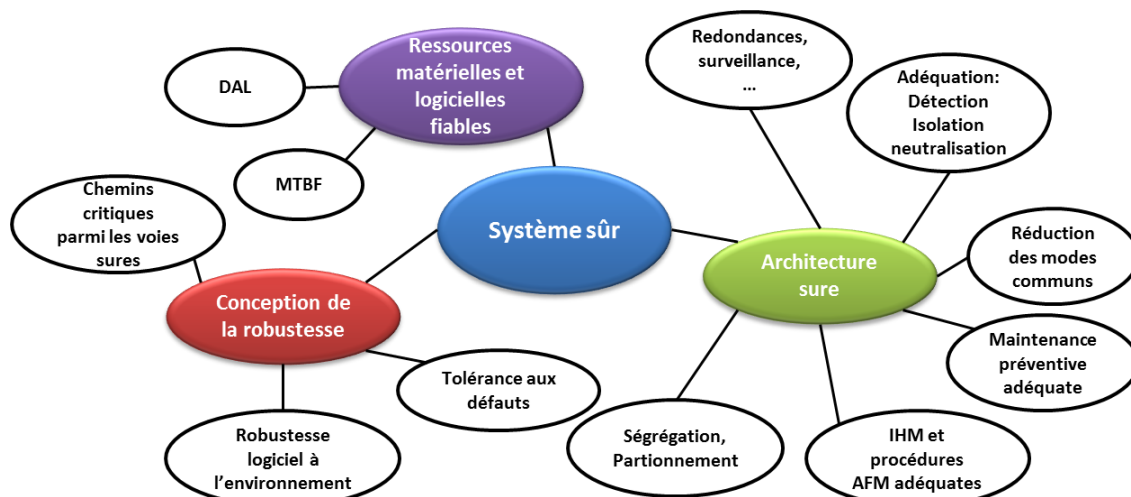


Figure I-8. Les bases d'un système sûr [MOR 11]

L'une des procédures la plus régulière et fiable permettant d'assurer le niveau de sûreté d'un aérodyne est la maintenance. Elle se résume à l'ensemble des activités visant à maintenir ou à ramener un bien, ou un système, dans un état ou dans des conditions spécifiques de sûreté de fonctionnement. Ces activités recouvrent autant le domaine de la technique (révision et/ou réparation), que de l'administration (identification et suivi de la cible), ou du management (prévisions de maintenance, allocation de ressources) [ZWI 95]. Il s'agit de l'un des moyens mis en place pour assurer la phase d'exploitation du système qui comprend la ***maintenance préventive***, la ***maintenance corrective***, et la ***maintenance systématique***.

La ***maintenance préventive*** a pour objet de réduire le risque de dégradations, voire de défaillances d'un système ou d'un bien. Les activités de maintenance systématique sont mises en œuvre selon un planning élaboré à partir de statistiques d'exploitation (utilisation normale, utilisation hors condition, stockage) prédéfinies. Les activités de maintenance conditionnelle, sont mises en œuvre selon l'évaluation de critères prédéfinis déterminant l'état de dégradation du système ou du bien [ZWI 95].

La ***maintenance corrective*** correspond aux activités de maintenance après l'apparition d'une défaillance dans le système, ou le bien. Cet exercice se compose notamment de la localisation de la défaillance, de la remise en état du système, et de la validation du bon fonctionnement.

La ***maintenance systématique*** se base sur des méthodes statistiques permettant d'estimer le nombre d'heures de vol avant la première défaillance (MTTF), puis entre chaque défaillance (MTBF). Il s'agit de la maintenance la plus répandue parmi les activités de maintenance des aérodynes. La Figure I-9 illustre de manière graphique les liens entre les différents termes identifiant les phases d'utilisation d'un système.

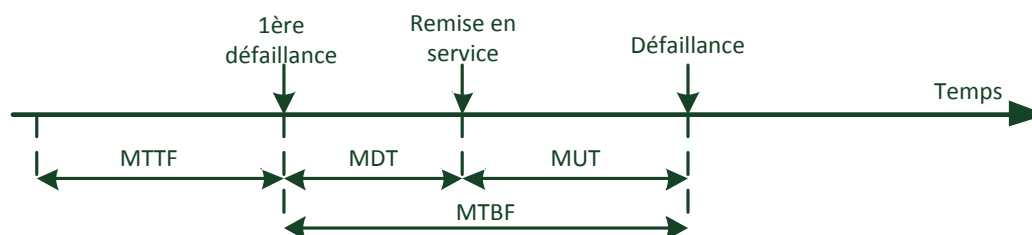


Figure I-9. Définition graphique du MTTF, MDT, MUT et MTBF [ZWI 95]

Ces méthodes de calcul ont fait l'objet d'un article dans les *Techniques de l'ingénieur* [MOR 05].

La Figure I-10 illustre les différents concepts de maintenance, la maintenance systématique étant à l'heure actuelle la plus courante. L'annexe *Détail des concepts de maintenance* précise ces différences plus explicitement.

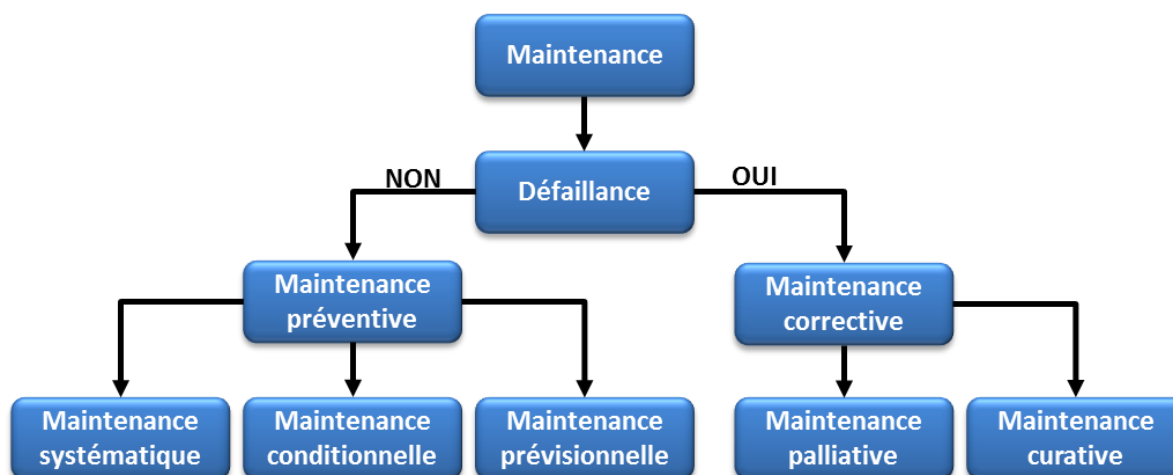


Figure I-10. Diagramme des différents concepts de maintenance [ZWI 95]

B.3. Solutions actuelles et évolutions technologiques

B.3.1. Techniques déployées

A l'heure actuelle, la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques est mise en œuvre de la manière la plus simple qui soit : la redondance. Ce principe de duplication des systèmes permet d'assurer l'intégrité et la disponibilité requise. Ainsi, la Figure I-11 illustre les redondances à mettre en œuvre en fonction des deux attributs précités. [MOR 11]

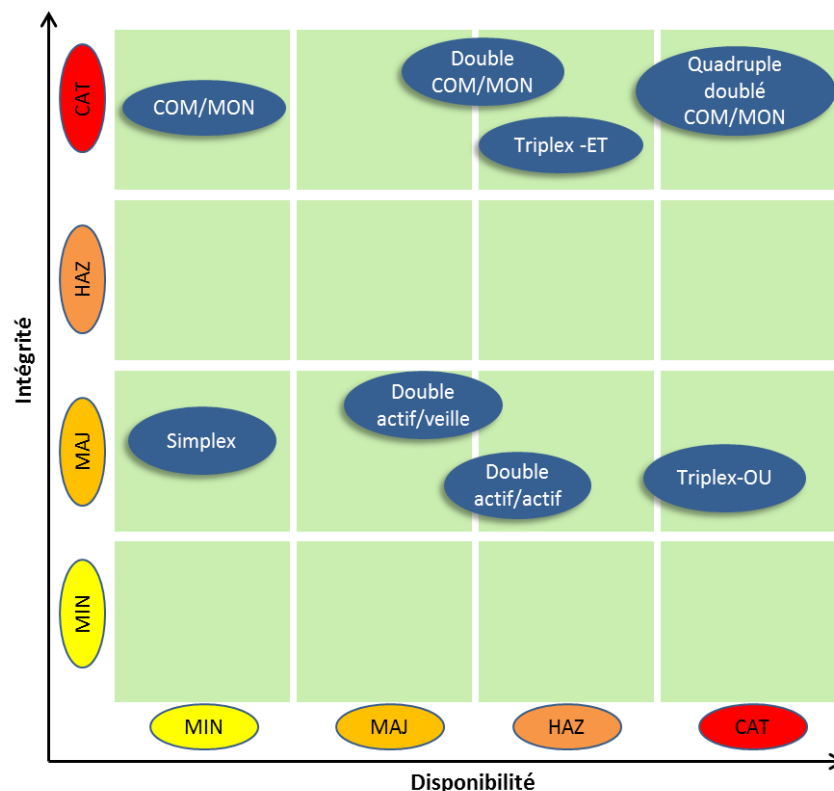


Figure I-11. Types d'architectures en fonction de la sûreté requise [MOR 11]

Il existe deux types de redondances, la redondance physique et la redondance analytique. La **redondance physique** consiste à dupliquer un certain nombre de fois le même système afin de réaliser une unique fonction ainsi que l'illustre la Figure I-12. Le nombre de redondances correspond au besoin en disponibilité et en intégrité du système redondé. Une redondance double vise à améliorer la disponibilité du système en cas de panne de la chaîne principale. Il s'agit d'une architecture COM/MON, c'est-à-dire une chaîne principale dite « *command* », et sa redondance pour la surveillance nommée « *monitoring* ». La redondance triple donne la possibilité à l'unité de traitement de réaliser un vote à trois, c'est-à-dire d'identifier la chaîne déficiente en comparant les résultats des trois chaînes entre elles, afin d'améliorer l'intégrité de l'ensemble.

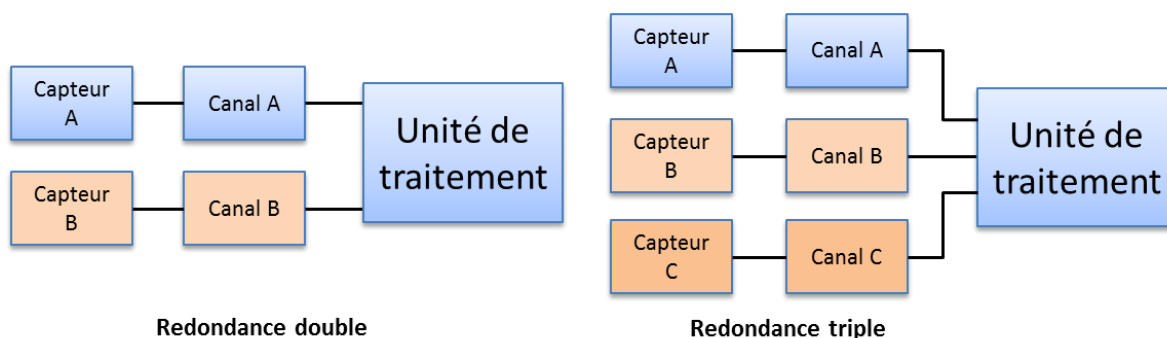


Figure I-12. Redondances physiques double et triple

Dans le cas des systèmes critiques où la disponibilité et l'intégrité sont considérées comme primordiales, l'architecture physique mise en place est une redondance double/triple/quadruple doublée (*dual-dual redundancy*), tel que le présente la Figure I-13. Nous pouvons constater que le volume et la complexité, et donc le coût de la fonction

augmentent proportionnellement aux besoins d'intégrité et de disponibilité des systèmes critiques lorsque la solution se base uniquement sur la redondance physique.

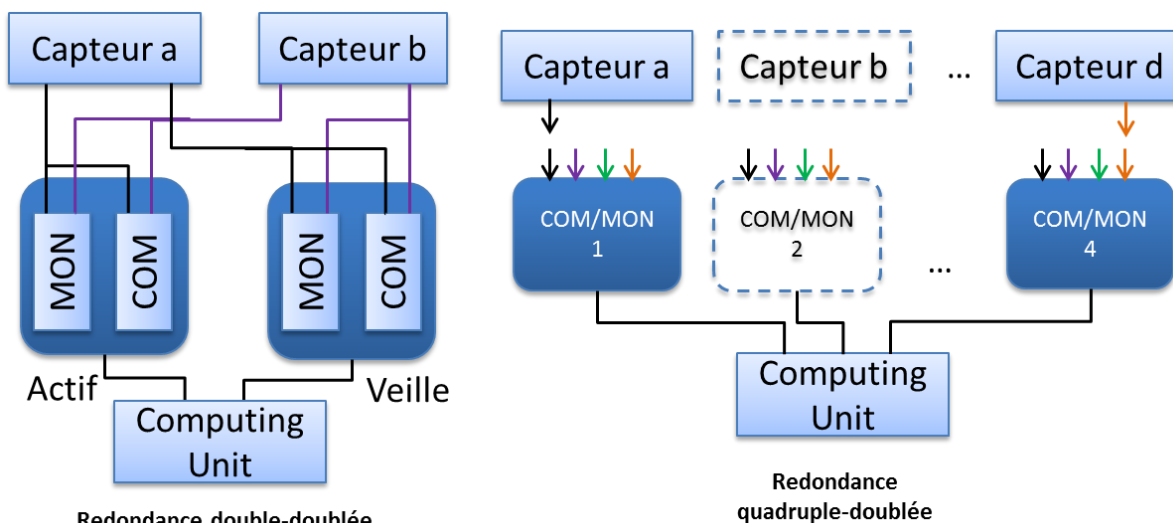


Figure I-13. Redondances doubles et quadruples -doublées

La **redondance analytique** consiste à remplacer au moins une duplication physique par le modèle mathématique correspondant. La redondance analytique peut se mettre en œuvre d'une seconde manière, elle peut se baser sur la corrélation entre le comportement d'un autre système et le comportement attendu. Par exemple, la température et la pression étant liées, l'utilisation de la mesure de pression comme entrée du modèle mathématique liant ces deux phénomènes permet d'estimer la cohérence du comportement de la température délivrée par notre chaîne redondée analytiquement. Dans les deux cas, le modèle mathématique intégré ne traite pas les mêmes défauts et perturbations que ses homologues physiques, par conséquent cette architecture introduit réelle « dissimilarité » entre la chaîne physique et le modèle mathématique.

Les exigences de DAL, notamment le DAL-A, étant très difficiles à atteindre, l'utilisation de la norme ARP4754 présentée précédemment est un réel atout qui intègre à la fois de la redondance physique et analytique. La Figure I-14 illustre les exigences de dissymétrie entre deux systèmes de DAL-B, dont l'ensemble correspond à un niveau de sûreté de DAL-A.

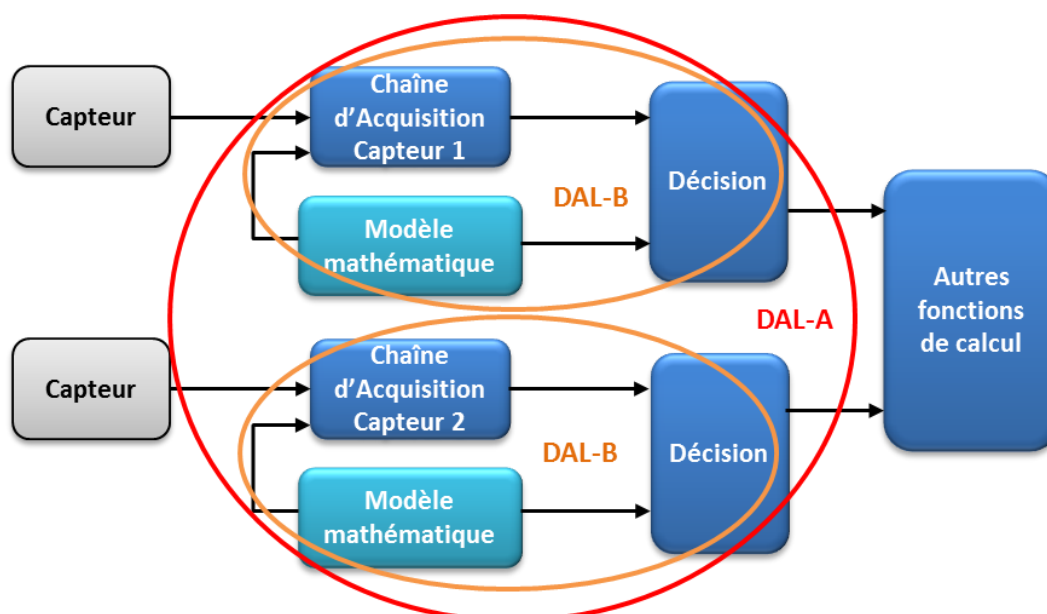


Figure I-14. Combinaison de deux chaînes dissymétrique en DAL-B pour atteindre un niveau de sûreté DAL-A

L'intégration de modèles mathématiques, et donc d'un peu plus d'intelligence, au sein de systèmes critiques, est conforme à la fois aux tendances technologiques actuelles et aux solutions techniques pouvant être implémentées.

B.3.2. Tendances technologiques et techniques

En premier lieu, les systèmes avioniques sont des systèmes extrêmement contraints au vu de leurs conditions d'utilisation : un environnement sévère qui restreint le choix des technologies applicables et qui impacte dangereusement la sécurité des systèmes embarqués, une très longue durée de vie (de 25 ans à 30 ans avec le rétro-fit) par rapport à la quasi-totalité des produits de hautes technologie accessibles à l'utilisateur lambda (smartphone, montre intelligente, ordinateur portable, véhicule automobile, etc.). Du fait de ces conditions, les systèmes ainsi mis en œuvre s'avèrent complexes au regard des fonctionnalités qu'ils intègrent, ce point sera éclairci par la suite.

En second lieu, poussés par les tendances dites « vertes », les systèmes aéronautiques se doivent de réduire leur volume, leur poids, et leur consommation énergétique (SWaP) afin de réduire la consommation de carburant de l'appareil. Cependant, bien que l'espace alloué aux équipements avioniques évolue très peu, les performances et le nombre de fonctionnalités intégrées n'ont cessé d'augmenter. De plus, afin d'assurer l'alimentation électrique de bord, les moteurs d'avion ont acquis une seconde fonction de générateurs électriques, en supplément de la propulsion. Par conséquent, la réduction des volumes, du poids, et de la consommation électrique devient un enjeu majeur.

En troisième lieu, les nouvelles technologies continuent à suivre la loi de Moore, le rapport performance/taille des composants électroniques développés doublant tous les 18 mois. En apparence, il s'agit d'un atout plutôt que d'une faiblesse pour la majeure partie des innovations de pointe, puisque l'on peut intégrer plus de performances de calcul dans un espace plus confiné, tout en réduisant la consommation électrique. Cependant la réduction de la finesse de gravure au sein des composants électroniques, tels que les microprocesseurs, engendre une plus grande sensibilité aux perturbations externes. Ce sont notamment les

bombardements neutroniques qui modifient les niveaux logiques internes (SEU, MBU) ainsi que les champs électromagnétiques des systèmes environnants [FLY 99].

En quatrième lieu, si l'on différencie les systèmes avioniques en fonction de leur criticité, il apparaît que les systèmes dit « critiques » s'avèrent intégrer des contraintes supplémentaires aux contraintes aéronautiques. En effet, afin de rendre « navigable » un système aéronautique critique, celui-ci doit assurer un certain niveau de sûreté de fonctionnement (*Dependability* en Anglais) [MOR 05].

B.3.3. Le contexte du SWaP

Le marché aéronautique tire les besoins ayant un impact significatif sur la conception des systèmes aéronautiques critiques. Il apparaît deux tendances majeures qui sont l'augmentation constante du trafic aérien (Figure 0-1) [AI 12] et qui par conséquent augmente le risque de pannes par heures de vol et la prise en compte du SWaP dont le principe est de réduire le volume, le poids, et la consommation électrique de l'équipement avionique à bord afin de réduire la consommation des aéronefs et d'améliorer le confort des passagers.

Dans ce contexte, l'amélioration de la sûreté de vol induit l'augmentation de la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques, ce qui se traduit aujourd'hui par l'augmentation des redondances principalement physiques. Le contexte du SWaP vise à réduire l'encombrement de l'ensemble des systèmes aéronautiques, ainsi que leur consommation d'énergie électrique.

Ainsi, de nombreuses innovations voient le jour, et certaines sont mises en œuvre afin de répondre à ces nouvelles exigences en terme de sûreté de fonctionnement et d'économie d'énergie des systèmes aéroportés. Nous pouvons notamment citer l'introduction de nouvelles architectures telles que l'IMA [DEF 10], ou encore quelques études visant à standardiser les interfaces des transducteurs (actionneurs, capteurs, moteurs électriques) [BOU 13], l'augmentation du contrôle de la structure de l'appareil [BOL 08], ou encore l'implémentation de fonctions de monitoring in-situ de l'appareil [XIE 04].

B.4. Synthèse

Ce sous-chapitre a détaillé ce que sont les systèmes critiques dans le domaine de l'aéronautique, ainsi que les enjeux qui gravitent autour de leur conception jusqu'à leur exploitation. Nous avons ainsi fait le lien entre les défauts et perturbations, et les conséquences sur la sûreté de fonctionnement des systèmes aéronautiques dans leur ensemble. Dans notre étude, nous avons mis l'accent sur la disponibilité et l'intégrité qui sont deux attributs majeurs de la sûreté de fonctionnement, et qui deviennent notamment des indicateurs pour l'assurance d'une haute fiabilité des systèmes critiques.

Le double constat suivant a été fait : d'une part, les nombreux standards et normes ont tendance à compliquer de plus en plus la conception de nouveaux systèmes critiques, via l'augmentation constante des contraintes de « certificabilité » ; d'autre part, les techniques déployées pour assurer la sûreté de fonctionnement d'un système critique sont gourmandes en volume, comme en poids, sans parler de leur complexité croissante. Néanmoins, les tendances de conception (SWaP) s'orientent, quant à elles, vers des systèmes moins encombrants, moins lourds, plus performants, et les moins coûteux possibles. Ces deux tendances peuvent être parfois contradictoires : plus de sûreté de fonctionnement, et une réduction des équipements en termes de volume/poids/consommation ! Cependant, l'évolution de la technologie qui tend à plus d'intégration et plus de performances, amène à reconsidérer les systèmes actuels

basiques vers des solutions intégrant plus « d'intelligence », et donc permettant de tenir compte au maximum de ces différentes tendances.

C. Les chaînes d'acquisition de grandeurs physiques

C.1. Introduction

Le système aéronautique critique que nous considérerons dans nos travaux est la partie régulation d'une boucle de contrôle moteur, et nous nous focaliserons plus particulièrement sur les chaînes d'acquisition nécessaires au fonctionnement de celles-ci. La Figure I-15 situe ce type de chaîne d'acquisition au sein d'une boucle de régulation.

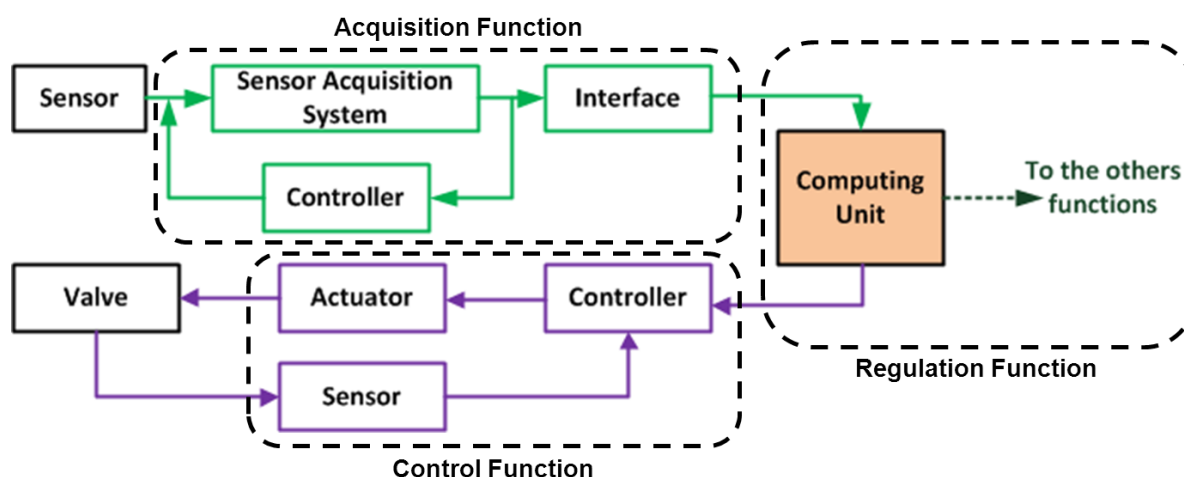


Figure I-15. Chaîne d'énergie d'une boucle de régulation moteur

Ce sous-chapitre adresse donc les chaînes d'acquisition de grandeurs physiques dans leur ensemble. Par le terme de *grandeur physique*, nous entendons pour les capteurs, la valeur de phénomènes tels que la température, la pression, la vitesse, ou le couple, mais pas les signaux électriques, ou électromagnétiques (ex : hertziens). Enfin, le terme transducteur utilisé ici désignera en premier lieu les capteurs même si la famille des transducteurs se compose également des actionneurs et des moteurs électriques.

C.2. Caractérisation

Une chaîne d'acquisition de grandeurs physiques se caractérise à travers trois éléments principaux : les grandeurs physiques, le capteur et le conditionnement du signal.

C.2.1. Les grandeurs physiques

Les grandeurs physiques sont classées en deux catégories distinctes : la grandeur physique à mesurer et les grandeurs physiques d'influence. Le t dans le cadre de nos travaux.

Tableau I-2 présente les grandeurs physiques auxquelles nous allons porter un plus grand intérêt dans le cadre de nos travaux.

Tableau I-2 Grandeurs physiques exploitées

Grandeur physique	Unités	Symbole
Température	Kelvin	K
Pression	Pascal	Pa
Vitesse	Mètre par seconde	m.s ⁻¹
Couple	Newton. Mètre	N.m

La grandeur d'influence, quant à elle, est un phénomène physique dont la puissance et le comportement impactent directement sur le moyen de mesure. Par exemple, la mesure d'une température est notamment impactée par la pression ambiante de même que l'accélération et les vibrations que subit le moyen de mesure influence son temps de réponse.

Il existe de nombreux travaux et ouvrages dans le domaine de l'instrumentation permettant de fiabiliser une mesure [ASC 06], ou encore les supports informatiques de *National Instrument*.

C.2.2. Le capteur

Un capteur est un matériel de conversion d'une grandeur physique mesurable directement, ou indirectement via un corps d'épreuve, en un signal électrique quantifiable [ASC 06]. Le corps d'épreuve est le mécanisme qui transforme une l'effet du mesurande, en une autre grandeur physique non électrique, qu'un capteur approprié convertit en grandeur électrique [BER 10]. La Figure I-16 illustre l'analyse fonctionnelle d'un capteur de manière générale.

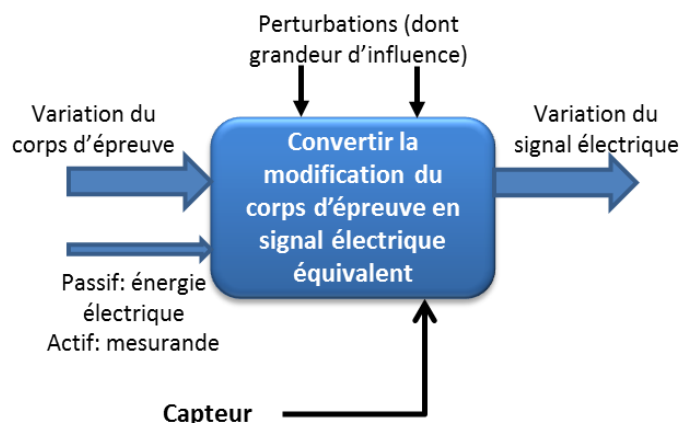


Figure I-16 Principe d'un capteur

D'un point de vue fonctionnel, le capteur reçoit la variation du corps d'épreuve ou du phénomène physique ainsi qu'une source d'alimentation dans le cas des capteurs passifs (ex : sonde de température de type RTD). Le capteur subit naturellement des perturbations externes telles que les grandeurs d'influence abordées précédemment, les perturbations dues à l'environnement (ex : CEM, température, chocs, vibrations, etc.), ainsi que l'effet de sa connexion avec d'autres éléments présents dans la chaîne de conditionnement en aval. Enfin le capteur délivre un signal électrique quantifiable dépendant de la valeur et du comportement du phénomène à mesurer. Il existe de nombreux capteurs servant à mesurer divers phénomènes physiques, la plupart de ces capteurs sont présentés dans [WIL 05].

C.2.3. Le conditionnement du signal

Le conditionnement du signal issu du capteur est une étape indispensable dès lors que l'utilisateur final de la mesure exige un certain niveau de performances techniques de la part de la chaîne d'acquisition. Cette fonction permet la mise en forme et la linéarisation du signal électrique délivré par le capteur, voir dans certains cas la numérisation de cette information. La Figure I-17 illustre de manière analytique l'étape de conditionnement. Dans le cas d'un capteur passif, il s'agit de la conversion de la variation d'impédance en une variation d'un signal électrique mesurable.

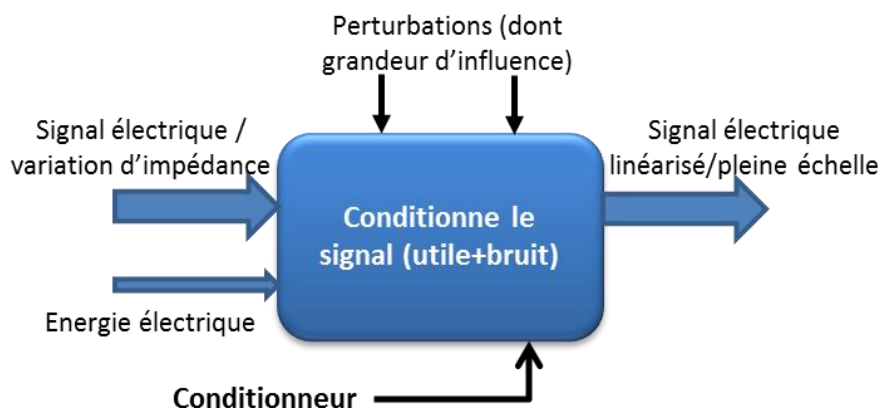


Figure I-17 Principe fonctionnel d'un bloc de conditionnement

Le conditionnement du signal peut donc se décomposer en un ensemble de sous-fonctions réalisant la mise en pleine échelle du signal électrique, son « nettoyage » des différents phénomènes le parasitant, la linéarisation du signal par rapport à la grandeur physique mesurée, ou encore sa numérisation. La Figure I-18 illustre l'ordonnancement de ces différentes fonctionnalités.

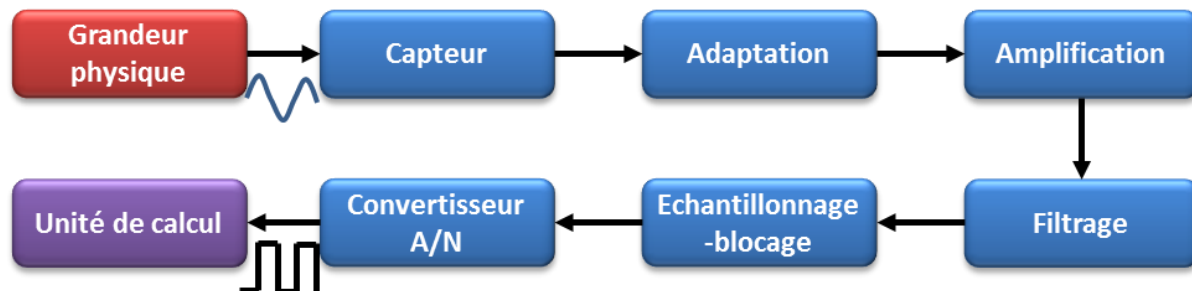


Figure I-18 Fonctionnalités d'un conditionneur de signal électrique

L'étage d'adaptation est directement dépendant de la nature du capteur utilisé et du dimensionnement de sa sortie au regard des spécifications techniques de conception de la chaîne d'acquisition. Dans le cas d'un capteur passif (ex : sonde de température de type RTD), un pont d'adaptation est nécessaire afin de traduire l'évolution ohmique du capteur en une variation de tension correspondante [ASC 06].

L'étage d'amplification permet d'obtenir un signal électrique pleine échelle afin de répondre aux exigences de conception de la chaîne d'acquisition capteur ou encore d'exploiter au mieux la plage de fonctionnement d'un convertisseur analogique-numérique connecté en aval. La Figure I-19 illustre de manière fonctionnelle l'étage d'amplification.

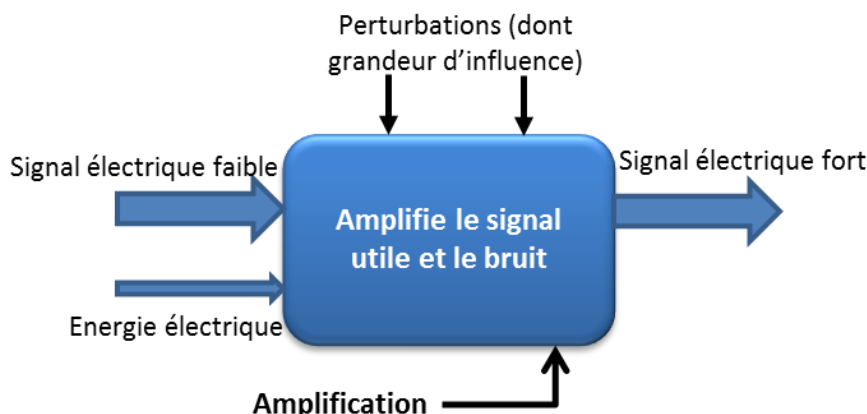


Figure I-19 Principe fonctionnel d'un bloc amplificateur

L'étage de filtrage permet l'élimination de fréquences parasites ainsi que d'une partie du bruit affectant le signal électrique originel. Il a également pour conséquences de limiter la réponse temporelle de la chaîne (si le signal évolue de manière trop abrupte, le filtrage limitera cette évolution) et de potentiellement réduire la valeur en tension du signal électrique mesuré. La Figure I-20 illustre le principe fonctionnel d'un étage de filtrage.

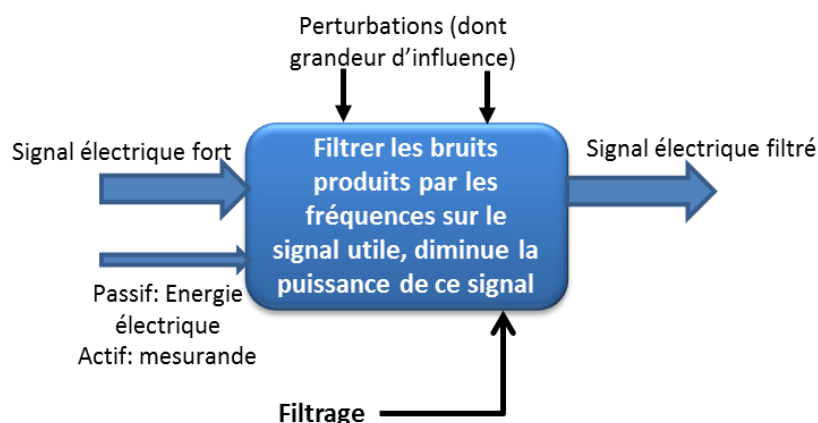


Figure I-20 Principe fonctionnel d'un bloc de filtrage

Une fois ces premières étapes réalisées, le signal peut être directement exploitable par la suite. Dans la plupart des cas (aéronautique), l'étage de numérisation est indispensable étant donné que l'information nécessite d'être robuste face aux perturbations externes lors de sa communication et sera traitée au sein de fonctions de contrôle et de surveillance.

L'étage de numérisation permet donc l'utilisation du signal électrique comme information par l'unité de calcul responsable de sa gestion et/ou de son utilisation. La numérisation permet également l'utilisation de filtres numériques plus efficaces et qui dégradent moins la qualité de l'information que les filtres analogiques. La numérisation se compose donc de l'échantillonnage-blocage et de la conversion numérique du signal électrique. Les Figure I-21 et Figure I-22 illustrent respectivement les principes fonctionnels de l'échantillonneur-bloqueur et de la numérisation.

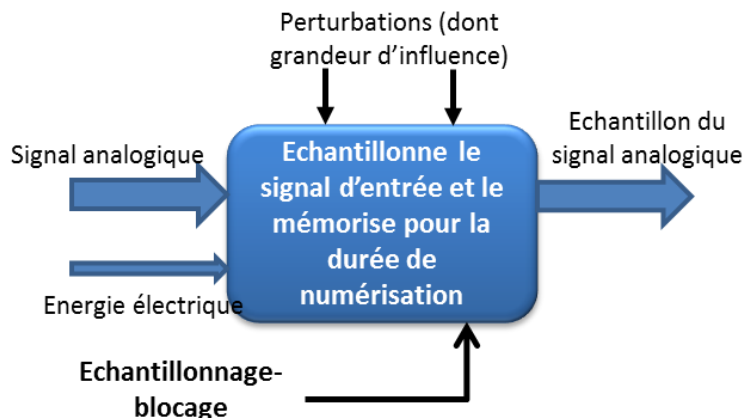


Figure I-21 Principe fonctionnel d'un échantillonneur-bloqueur

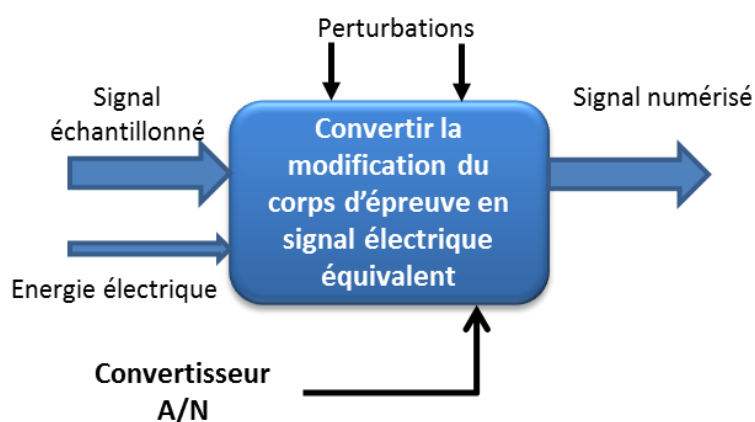


Figure I-22 Principe fonctionnel d'un convertisseur analogique-numérique

Le sous-chapitre suivant aborde ces tendances à l'intégration d'une intelligence croissante au plus près des capteurs (« smart sensors ») initiées dans le domaine de l'instrumentation pour de nombreuses raisons techniques et pragmatiques, et désormais ré-exploitées dans de nombreux domaines industriels tels que la sécurité, la sûreté de fonctionnement ou le contrôle d'environnement à diverses échelles.

C.2.4. Les défauts et erreurs répertoriés dans les systèmes de mesure

A partir d'études et d'ouvrages tirés du domaine de l'instrumentation et de la sûreté de fonctionnement [KE 04], [AVI 00], ainsi que de notes techniques d'installation et d'utilisation de capteurs, nous avons réalisé une classification des défauts et des erreurs pouvant subvenir au sein d'une chaîne d'acquisition de grandeurs physiques. La Figure I-23 dissocie les perturbations des défauts, et classe les catégories de défauts existants en **défauts d'utilisation**, **défauts de conception**, et **défauts de fonctionnement** :

- un **défaut d'utilisation** correspond à l'apparition d'une anomalie au sein du système, qui a pour cause l'utilisation du système en dehors des conditions de fonctionnement prévues comme par exemple le dépassement de la plage de température acceptable ou encore l'envoi d'une commande erronée au système ;
- un **défaut de conception** est une anomalie due à une erreur ou à un cumul d'erreurs lors du processus d'élaboration de l'entité (le processus classique de conception de système aéronautique critique sera présenté au sein du chapitre 1, partie IV) comme par exemple

l'absence de blindage du système dans un environnement soumis à de fortes contraintes (champs électromagnétiques puissants, vibrations provoquant des ruptures de connectiques, etc.),

- un **défaut de fonctionnement** est une anomalie apparaissant lors de l'utilisation du système, il correspond typiquement à l'usure du système comme par exemple la modification des propriétés physiques d'un composant lors de son utilisation (ex : la charge-décharge-recharge-etc. d'une batterie électrique).



Figure I-23. Classification des défauts d'une chaîne d'acquisition

C.3. Tendances technologiques et techniques

L'accroissement continu des besoins de fiabilité et d'intégrité des mesures dans les systèmes de production de biens et de services ont amené à l'augmentation constante du nombre d'entités de mesure et de contrôle. Avec l'utilisation de plus en plus fréquente des bus numériques, le concept de réseaux de transducteurs (capteurs dans notre cas) et de capteurs intégrant des fonctionnalités plus poussées s'est inscrit dans les tendances technologiques de l'instrumentation. A travers divers projets de recherche [BAY 05] de nombreux besoins d'informations ont fait surface, tels que le contrôle-commande, la sûreté (sécurité des personnes), la maintenance, la gestion de production, la gestion technique, l'amélioration de performances, la traçabilité des équipements, les aides à la configuration et à la mise au point.

C.3.1. Des travaux de recherche et développement variés

Les travaux de recherche et l'implémentation de nouvelles chaînes capteurs peuvent prendre des directions très variées. Nous pouvons citer le développement des réseaux de capteurs sans fil, qui intègrent des fonctions de décision [AR 06], de communication, et de gestion d'énergie [VAZ 10]. Il s'est également développé des traitements de données en provenance des capteurs, tels que la fusion de données pour faciliter leur exploitation ou leur communication [ALA 01]. Par la suite, d'autres applications plus poussées se sont développées où l'on vise à conjuguer la gestion d'information avec la gestion du réseau et de sa fiabilité. Comme cas d'exemple, le contrôle santé devient un véritable enjeu, autant dans le domaine du bâtiment [KAT 05], [PAE 05], au sein des structures mobiles [STA 04], [BAL 06], dans l'environnement [OLI 11] ainsi que dans le domaine médical [KO 10].

En parallèle, la loi de Moore continue de se vérifier par la diminution de la finesse de gravure, les MEMS, NEMS, MOEMS étant les exemples les plus parlants dans le domaine de la mesure. Bien évidemment, cela impacte directement les performances techniques et les coûts de production, et met en évidence de nouvelles problématiques autour de la consommation d'énergie et de la sensibilité aux perturbations externes de ces systèmes miniaturisés.

Enfin, l'aspect « *plug'n play* » devient de plus en plus prépondérant afin de « démocratiser » l'ensemble des applications nécessitant des capteurs. Dans cette optique, la norme IEEE1451 dite standard des « TEDS » est une norme récemment définie visant à standardiser les interfaces des transducteurs dans leur ensemble. L'historique de l'IEEE 1451 se fonde sur les besoins exprimés dans le domaine de l'instrumentation où les processus actuels de mesure, de contrôle, et de surveillance tendent vers une augmentation de leurs performances et de leur diversité, et par conséquent du nombre de capteurs à déployer autour d'une application donnée. L'idée étant donc de réduire la diversité des interfaces capteur trop peu standard.

Les objectifs principaux de l'IEEE 1451 tels que définis par [IE 04] ou simplifiés [NI 05] sont de :

- Permettre le plug-and-Play au niveau du transducteur en fournissant une interface compatible avec les transducteurs de manière générale
- Permettre et simplifier la création de transducteurs plus « smart »
- Faciliter le support sur de multiples réseaux de communication
- Simplifier l'initialisation et la maintenance des systèmes d'instrumentation
- Fournir un pont entre les moyens d'instrumentation classiques et les transducteurs multimodes
- Permettre l'implémentation de transducteurs « smart » en utilisant le moins de mémoire possible

L'ensemble des travaux précités permet d'identifier une tendance d'intégration de fonctions au plus proche capteur, de sa miniaturisation, et du respect des besoins croissants en termes de sûreté de fonctionnement et de fiabilité de ces systèmes de mesure [BRI 08]. Ceci amène à reconsidérer la terminologie anciennement utilisée pour définir les capteurs et ces nouvelles chaînes d'acquisition plus intégrées.

C.3.2. Du capteur basique au capteur « intelligent »

Plusieurs études définissent les différences entre un capteur « smart » et un capteur « intelligent » [CLA 00], [YUR 10], [MUK 08], [IF 10]. Nous nous baserons sur le document élaboré par le CIAME [BAY 05], qui dissocie les notions de capteur basique, capteur smart, et capteur intelligent de la manière suivante :

- un **capteur basique** est un simple transducteur permettant la conversion d'une grandeur physique en un signal électrique correspondant et quantifiable, au besoin l'opérateur doit donc concevoir la chaîne d'acquisition répondant à ses besoins ;
- un **capteur « smart »** intègre des fonctionnalités qui améliorent ses aptitudes métrologiques, grâce à des fonctions embarquées de traitement et de sauvegarde des données, telle qu'une fonction de linéarisation de la réponse du capteur, ou encore la prise en compte de grandeur d'influence ;
- un **capteur « intelligent »** intègre à la fois les fonctionnalités d'un capteur « smart », ainsi qu'une aptitude à rendre crédible ces mêmes fonctionnalités, le terme de crédibilisation faisant référence à la fiabilité et à l'intégrité du capteur et des données qu'il délivre.

Par rapport aux capteurs basiques, ces capteurs « smart » ou « intelligent » intègrent généralement une interface de communication plus standard, analogique ou numérique, avec le reste du système. Cette notion de capteurs « smart », voire « intelligent », rejoint directement les applications de type réseau de capteurs sans fil et système tolérant aux défauts, notamment à travers des propositions de standards [KHE 06].

La Figure I-24 illustre les différences fonctionnelles entre un capteur « smart » et un capteur « intelligent ». Un capteur « Smart » se compose d'un capteur classique (exemple : RTD, LVDT, thermocouple, etc.), d'un module de traitement du signal, et d'une interface standard. Le module de traitement du signal se compose d'une mémoire stockant les informations de compensation à exploiter pour délivrer une mesure fiable. Un capteur « Intelligent » se compose des fonctionnalités d'un capteur « Smart », ainsi que d'une fonction de décision servant à estimer l'intégrité de la donnée à transmettre.

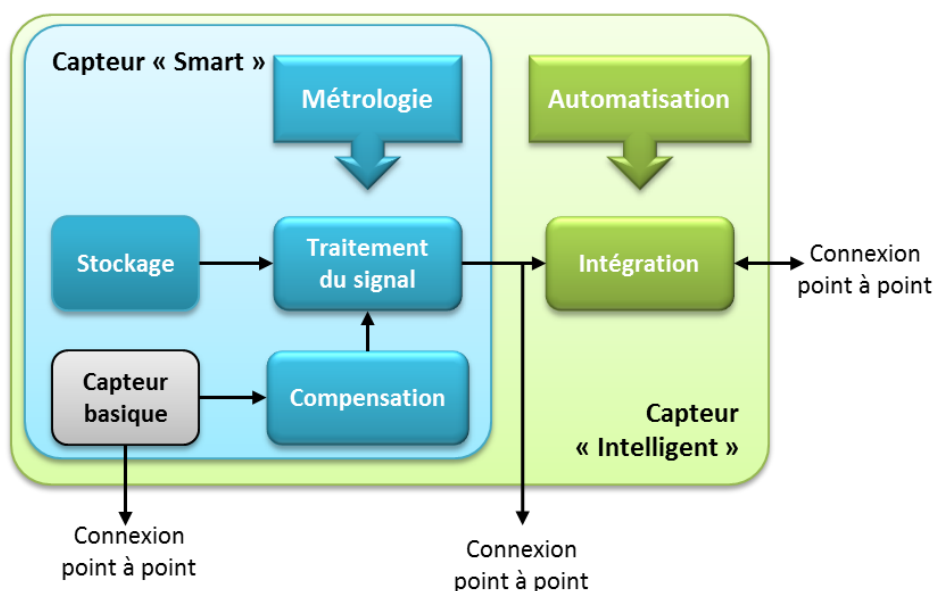


Figure I-24. Du capteur basique au capteur intelligent [BAY 05]

C.4. Synthèse

L'ensemble des travaux de recherche et développement présentés dans ce mémoire démontrent une nette convergence de conception d'ensemble capteurs plus fiables, plus intègres, et plus autonomes pouvant ainsi accomplir plus de tâches dans divers domaines. Ceci est aussi le cas dans le secteur de l'aéronautique et notamment de la conception de systèmes critiques où nous y retrouvons les contraintes en termes d'intégrité et de fiabilité [MOR 11]. Néanmoins, cette tendance, dans le cadre aéronautique, est confrontée aux aspects contraignants de la certification définis par les nombreuses normes existantes.

D. Détection et Diagnostic de défauts

Dans le cas des chaînes d'acquisition capteur, il existe un vaste panel de causes engendrant les défauts présentés. Notre étude se concentre sur leurs effets au sein de la chaîne critique d'acquisition de grandeur physique. Cela a notamment pour conséquence de prendre en

considération les effets de perturbations actuellement non modélisables telles que les champs électromagnétiques au sein d'un environnement très fortement contraint.

D.1. Définition et Terminologie

La terminologie adoptée dans cet ouvrage a notamment été proposée par le comité technique de l'IFAC SAFEPROCESS [LAP 92, ISE 97]. Le concept de système tolérant aux défauts (FTC) est introduit par [LAP 85], [BLA 06], et [GOU 11].

Les processus de détection de défauts, de diagnostic de défauts, de surveillance de fonction, et de supervision de fonction peuvent être organisés tel que l'indique la Figure I-25 [BAY 05].

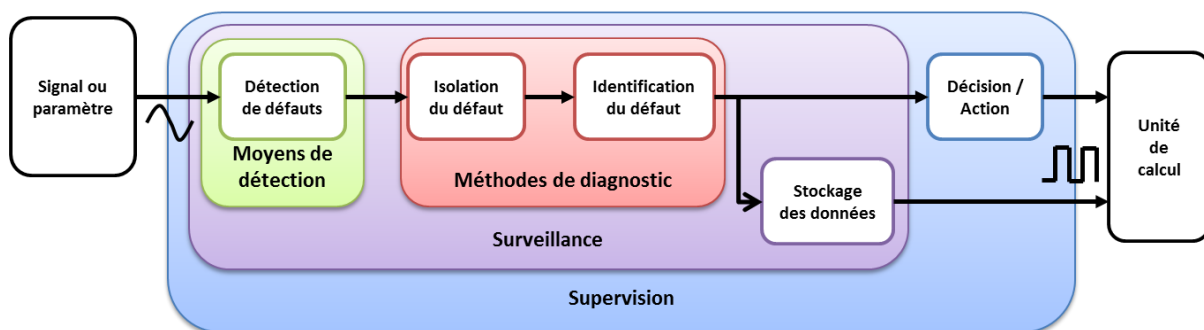


Figure I-25. Illustration de la détection de défauts jusqu'à la supervision

La chaîne de supervision se compose des processus de détection de défaut, de diagnostic de défaut, et de surveillance de défauts. Chaque fonctionnalité est dépendante du bon fonctionnement de la fonctionnalité précédente.

- La **détection de défaut** est un moyen de perception de l'apparition d'un défaut, la perception correspondant à la reconnaissance d'une anomalie au sein du système, la détection correspondant à l'identification comme défaut de l'anomalie perçue.
- Le **diagnostic de défaut** se base sur les deux composantes distinctes que sont l'isolation du défaut et l'identification du défaut, l'analyse de leur conclusion permettant d'énoncer un diagnostic.
- L'**isolation du défaut** correspond à la détermination du type, de la position, et de l'heure d'apparition du défaut.
- L'**identification du défaut** permet de déterminer la valeur et le comportement temporel du défaut.
- La **fonction de surveillance** (Monitoring) regroupe dans l'ordre le moyen de détection, la méthode de diagnostic, et un moyen de stockage de données pour l'historisation des données générées, elle renvoie notamment l'état estimé du système surveillé. Le Monitoring est une fonction continue temps-réel visant à déterminer les conditions d'un système physique, en enregistrant les informations reconnues et indiquant des anomalies de son comportement.
- L'étape de **supervision** intègre le processus de surveillance ainsi qu'une fonction de décision et/ou d'action. Elle a pour objectifs la surveillance d'un système physique et la prise de décisions et/ou d'actions appropriées afin de maintenir le système opérationnel lors de l'apparition de défauts.

Dans le domaine de l'automatique, la détection et le diagnostic de défauts sont des fonctionnalités permettant leur prévision ou leur correction au sein du système surveillé. Le processus global se conduit tel que présenté par la Figure I-26. A partir des données d'entrée et des données de sortie, la fonction de FDI (Fault Detection and Identification) ou de FDD (Fault Detection and Diagnosis) a la possibilité de cibler le défaut ayant apparue.

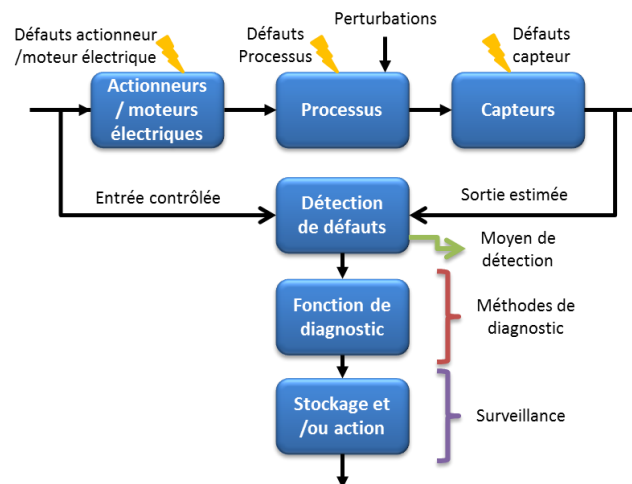


Figure I-26 . Intégration d'une fonction de détection et de diagnostic de défauts [ISE 05]

Dans cette représentation nous retrouvons le processus illustré par la Figure I-25 du bloc « Détection de défauts » au bloc « Stockage et/ou action ». Cette représentation correspond à la majorité des processus de détection et de diagnostic de défauts, tels que présentés par la suite.

D.2. Classifications des méthodes de détection et de diagnostic de défauts

L'état de l'art que nous présentons ici n'a pas pour but d'être exhaustif mais de mettre en avant le large panel de moyens de détection et de méthodes de diagnostic de défauts existant dans la littérature. Chaque auteur propose une classification spécifique en fonction de son domaine d'application (comme le contrôle de processus industriel [ISE 05], le contrôle de mesure chimique [VEN 02a], le contrôle commande [DIN 08], etc.). Ces différentes classifications ont pour points communs les outils mathématiques utilisés (algèbre, calcul, statistiques) et certains domaines d'application (aéronautique, automobile, communication, traitement du signal, surveillance et/ou contrôle) [GUS 00].

Afin de couvrir le plus de domaines d'application et le plus grand nombre d'auteurs connus sans réaliser une synthèse trop exhaustive, nous avons sélectionné des auteurs tels que S.X.Ding [DIN 08], R.Isermann [ISE 97, ISE05, ISE 06], M.Basseville & V.Nikiforov [BAS 93], et V.Venkatasubramanian [VEN 02, VEN 03, DAS 00]. Ici nous nommerons « processus complet » le processus de détection de défaut jusqu'à son diagnostic.

D'après S.X.Ding [DIN 08], le processus complet, c'est-à-dire de la détection de défaut jusqu'au diagnostic, se base successivement sur la **génération de résidus**, puis **l'évaluation du défaut** perçu. La **génération de résidus** permet d'obtenir un signal sensible au(x) défaut(s) souhaité(s). Les méthodes employées sont orientées « espace de parité » [GER 02] ou encore « observateur d'état ». L'évaluation du défaut perçu vise à localiser et à identifier le(s) défaut(s) perçu(s), la mise en œuvre de cette fonctionnalité passant par la mise en place de

méthodes mathématiques simple CUSUM (Cumulative Sum), jusqu'à des algorithmes adaptatifs tels que les réseaux de neurones [PAT 94, QUA 10] ou encore les algorithmes génétiques [CHA 01].

D'après R.Isermann, [ISE 97, ISE 05], nous retrouvons la notion de *génération de résidu* à travers la *Fault Detection and Identification (FDI)*, ainsi que *l'évaluation du défaut* avec la *Fault Detection And Diagnosis (FDD)*. La FDI classe les moyens de détection/perception de défauts par l'analyse d'un signal simple, ou par l'analyse de signaux multiples ou de modèle. La Figure I-29 illustre la classification des méthodes de détection de défauts selon R.Isermann. Nous y retrouvons notamment la détection de franchissement de seuil, et la détection de gradient qui sont des moyens très utilisés dans l'aéronautique pour la détection de pannes franches. La Figure I-29 est également jointe en annexe *Vue d'ensemble des méthodes de détection et de diagnostic de défauts*.

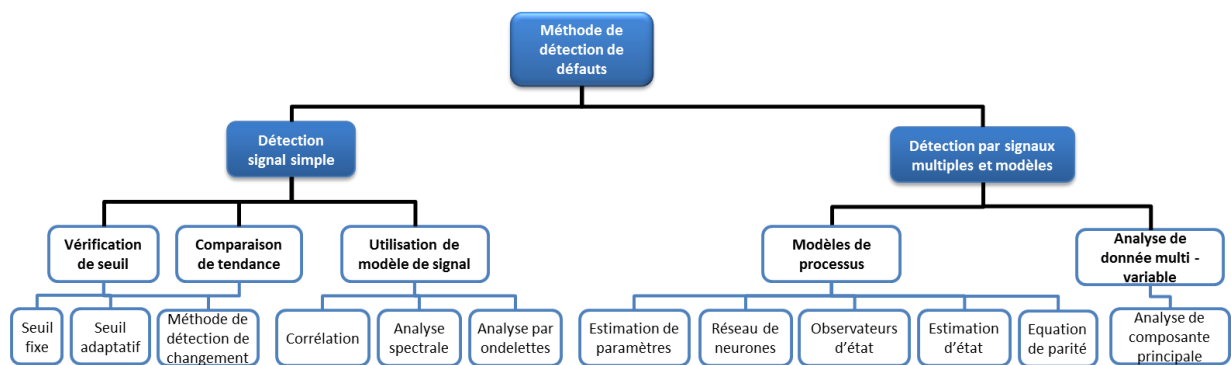


Figure I-27. Vue d'ensemble des méthodes de détection de défauts [ISE 05]

La FDD se distingue par deux catégories de méthodes de diagnostic, ou d'évaluation du résidu, à travers les méthodes de classification des défauts, et les méthodes d'inférence. Ces dernières fonctionnent de la même manière qu'un raisonnement humain, où l'on détermine la cause à partir des symptômes. Au sein de cette classification, nous retrouvons notamment les arbres de défauts (FTA) systématiquement utilisés dans la conception de systèmes aéronautiques [VES 13]. La Figure I-28 illustre la classification des méthodes de diagnostic selon [ISE 05], et est également jointe en annexe *Vue d'ensemble des méthodes de détection et de diagnostic de défauts*.

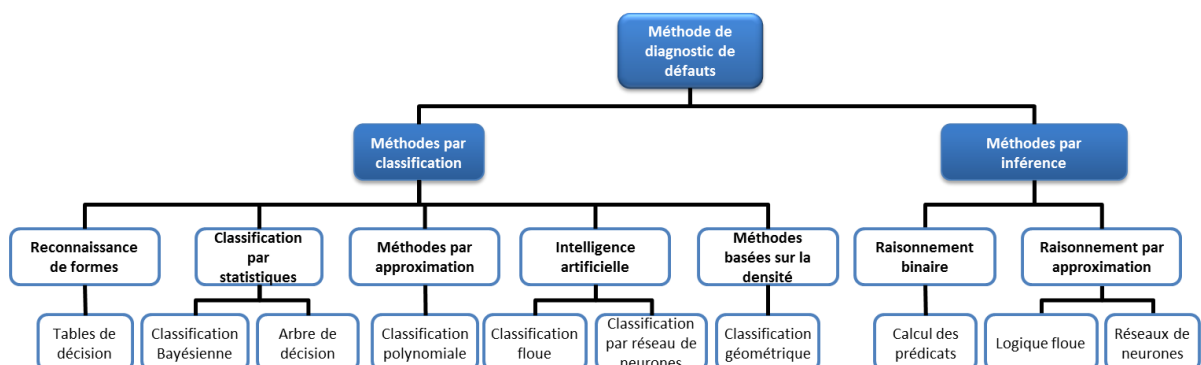


Figure I-28. Vue d'ensemble des méthodes de diagnostic de défauts [ISE 05]

Dans son livre [ISE 05], R.Isermann identifie également deux principales tendances des FDI et FDD confondues, celles-ci s'orientent sur l'estimation d'état et sur l'estimation de paramètres pour détecter et diagnostiquer les défauts.

Dans leur ouvrage, M.Basseville et V.Nikiforov [BAS 93] se sont concentrés sur l'aspect de conception et d'investigation de moyens pour la détection de changement dans un système en activité (on-line). Les auteurs ont ainsi trié les méthodes de détection de changement en fonction de trois topologies de problèmes rencontrés en traitement du signal : l'analyse de série temporelle, le contrôle en automatique, et le contrôle qualité en industrie. Lors de la conception de la détection et de l'estimation de changement, les auteurs distinguent deux étapes : la **génération de résidus** et la conception de **règles de décision**. Ces deux étapes étant pratiquement similaires au processus présenté par S.X. Ding [DIN 08]. Les auteurs définissent la **génération de résidus** comme une mesure artificielle conçue pour refléter les changements intéressants possibles sur le signal ou le système analysé. On y retrouve les méthodologies du type contrôle par redondance analytique. Dans d'autres cas, la valeur moyenne ou les propriétés du spectre du résidu peuvent changer simultanément avec les changements du système. La conception de **règles de décision** basée sur les résidus générés est une tâche visant à résoudre le problème d'un changement détecté et représenté par les résidus. Enfin, les auteurs dissocient les défauts dont l'origine est temporelle des défauts événementiels.

L'auteur V.Venkatasubramanian [VEN 02a, 02b, 03], propose une classification différente qui fusionne la détection de défauts (ou la génération de résidus) avec le diagnostic de défauts (analyse du résidu). Il développe une classification basée sur les connaissances disponibles du processus/système à surveiller. Les méthodes de diagnostic à base de modèle étant optimales lorsque les informations sur le processus permettent leur compréhension et leur mise en œuvre. La classification proposée différencie les méthodes basées sur les modèles quantitatifs, les méthodes basées sur les modèles qualitatifs, ainsi que les processus basés sur l'historique du système:

- Un **modèle quantitatif** utilise le raisonnement « causes-effets » du comportement du processus surveillé. Les méthodes les plus populaires basées sur ce type de modèle sont les arbres de défauts et les digraphes signés. Les arbres de parcours de pannes (FTA) utilisent un raisonnement inductif jusqu'à retrouver l'événement principal ayant causé la déviation du processus observée. Les digraphes signés, quant à eux, sont des modèles fiabilistes graphiques représentant les informations dans lequel les variables du processus sont représentées [DAS 00].
- Un **modèle qualitatif** établit des relations mathématiques entre les variables et le modèle du processus sous une forme exploitable (ex : équation différentielle). Ces modèles décrivent des phénomènes physiques tels que la température, la masse, l'équilibre temporel, les réactions cinétiques. Ils peuvent être statiques ou dynamiques, linéaires ou non-linéaires. Nous y retrouvons notamment les espaces de parités ou encore le filtrage de Kalman.
- Un **processus basé sur l'historique du système** se scinde entre les données qualitatives et les données quantitatives. A contrario des approches à base de modèle élaborées à partir de connaissances « a priori » du processus, seule la disponibilité d'une large base de données de l'historique du processus est nécessaire. A partir de l'extraction des données de l'historique, il est possible de les représenter sous forme de connaissances « a priori » du système (ex : réseau de neurones). Le processus d'extraction des données peut être de nature quantitative ou qualitative. Deux des méthodes les plus utilisées pour l'extraction de données dites qualitatives sont les systèmes experts (tels que les PCA) [LI 00] et les méthodes de modélisation de tendances. Les méthodes permettant l'extraction d'informations quantitatives peuvent être largement classifiées comme des méthodes statistiques ou non-statistiques.

D.3. Critères de désirabilité

Les méthodes de détection et de diagnostic de défaut analysées et démontrées par les auteurs précédemment cités ont prouvé qu'il n'existe pas (au moins à l'heure actuelle) une seule solution générique pour tous les problèmes rencontrés. Par conséquent, le concepteur souhaitant intégrer des fonctions de détection et de diagnostic de défaut doit évaluer les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes et déterminer la plus optimale par rapport à ses besoins.

Certains auteurs tels que Basseville & Nikiforov, et Venkatasubramanian proposent un ensemble de critères de sélection permettant de faire le tri entre les différentes méthodes existantes. Dans l'ouvrage [BAS 93], les critères suivants sont mis en avant, en regard de leur objectif qui est la détection de changements :

- Temps moyen entre les fausses alarmes ;
- Probabilité de fausse détection;
- Durée moyenne pour la détection;
- Probabilité de non-détection;
- Précision du temps de changement et estimation de son ampleur.

La table « *Fault-detection methods for closed loop in normal operation condition (no test signals) for some fault* » présentée par R.Isermann [ISE 05] met en évidence le taux de couverture de défauts en fonction des différents moyens de détection. Le Tableau I-3 présente les résultats de ses analyses.

Les travaux menés par Dash et Venkatasubramanian [DAS 00] illustrés par le Tableau I-3 présente une classification des méthodes de diagnostic en fonction de leurs performances et du niveau de connaissance disponible pour chacune d'entre elle. Ce tableau met en avant une liste de critères dont certains s'avère être en opposition de phase (i.e. Détection rapide versus Facilité d'explication).

Tableau I-3 . Comparaison de méthodes de diagnostic en fonction de critères de désirabilité [DAS 00]

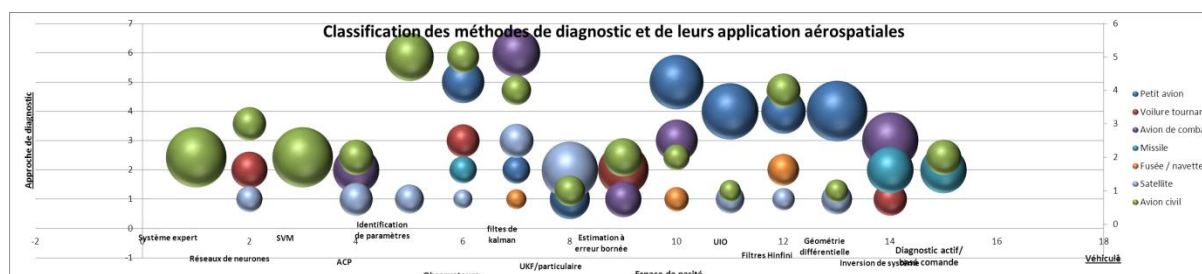
	Observateur de parité	Estimation de paramètres	Filtre de Kalman étendu	Approches innovantes	Classification Bayésienne	Réseaux de neurones	Modèles causals	Regroupement hiérarchique
Rapidité de détection	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓
Aptitude d'isolation du (des) défaut(s)	✓	✓	✓	—	✓	✓	X	X
Robustesse	✓	?	?	—	✓	?	X	X
Identification de nouveautés	✓	X	✓	—	X	?	X	✓
Niveau de prérequis pour la modélisation	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓
Identification de défauts multiples	✓	✓	✓	—	?	?	✓	✓
Facilité d'explication	X	X	X	X	X	X	✓	X
Capacité de stockage et de calcul	X	X	✓	✓	✓	✓	X	✓
Estimations d'erreurs a priori	✓	X	X	—	✓	X	X	X
Adaptabilité	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓

Ici, la coche valide le critère vis-à-vis de la méthode de diagnostic désignée. La croix indique que ce critère n'est pas un point fort de la méthode de diagnostic désignée. Le trait indique que le critère n'est pas applicable à la méthode de diagnostic désignée. Enfin, le point d'interrogation indique que l'importance du critère par rapport à la méthode de diagnostic désignée va dépendre de la situation du système.

D.4. Applications à l'aéronautique

D.4.1. Mise en œuvre de ces méthodes dans l'aéronautique et l'aérospatial

Ainsi que l'ont présenté les classifications de Ding, Isermann, et Venkatasubramanian, le nombre de méthodes de détection et de diagnostic de défauts dans la littérature est impressionnant. Cependant, leur utilisation dans les domaines aéronautique et spatial est bien moindre !

**Figure I-29. Classification de l'utilisation des méthodes de diagnostic [MAR 11]**

Dans ses travaux [MAR 11], Marzat a classifié un ensemble de méthodes de diagnostic en fonction de leurs applications aérospatiales repris dans la Figure I-29, et jointe en annexe *Classification de l'utilisation des méthodes de diagnostic [MAR11]*.

Il se dégage de cette étude deux tendances majeures, l'acteur moteur et le type d'application le plus récurrent. L'acteur majeur de l'intégration de méthodes de diagnostic dans l'aérospatial est l'avion civil (e.g. du Falcon à l'A380), et son type d'application récurrent est le contrôle commande et la surveillance de fonctions critiques. Cette classification souligne également le fait qu'aucune méthode de diagnostic n'est spécifique à une seule application, chaque méthode de diagnostic répondant de manière spécifique à un besoin provenant d'une application.

D.4.2. Pistes de recherche

Dans l'idée de rendre notre Chaîne d'Acquisition Capteur plus tolérante aux défauts, deux orientations se dégagent de l'état de l'art réalisé précédemment.

En premier lieu, il est possible d'intégrer des fonctionnalités supplémentaires visant à faciliter la recalibration du système lors de maintenances systématiques. En effet, au regard des nouveautés techniques et des tendances de conception, il apparaît clairement le besoin d'un plus grand contrôle et d'une surveillance accrue des systèmes aéronautiques (pas uniquement critiques) permettant d'augmenter leur niveau de ***tolérance aux défauts***. De nombreuses contraintes ne permettent pas la mise en œuvre de redondances multiples, il apparaît donc utile de s'orienter donc vers la mise en œuvre de fonctions de calibration et de reconfiguration en temps réel ou de manière systématique : auto calibration, autotest, reconfiguration dynamique [STE 05], communication en réseau [BOU 13], correction d'erreurs, optimisation d'alimentation [YUR 03].

En second lieu, il est possible d'utiliser la représentation mathématique du système comme « redondance virtuelle » afin d'ajouter à notre système une fonction de détection et de diagnostic de défauts. Dans la littérature, de nombreuses solutions proposent l'intégration de modèles mathématiques correspondant à la fonction surveillée. Les modèles mathématiques implémentés peuvent correspondre au ***modèle physique*** (ou modèle de connaissance) du système à surveiller, celui-ci correspondant à la représentation mathématique de sa fonction de transfert, ou bien au ***modèle empirique*** (ou de représentation) du système à surveiller, celui-ci correspondant à la représentation mathématique de ses états prévisibles.

D.4.3. Verrous technologiques

De nombreux verrous technologiques limitent les pistes de recherche que nous pouvons explorer, dans notre cas ils se situent au niveau de l'intégration d'intelligence et d'autonomie au sein de la chaîne d'acquisition. Les trois principaux verrous identifiés sont l'autonomie en énergie, la configuration du système en boucle ouverte, et le niveau de connaissance du système et de son environnement.

L'aptitude d'autonomie en énergie d'un système lui permet de garantir son fonctionnement lors de défaillances ponctuelles du système d'alimentation électrique général. En plus de l'alimentation secondaire, la récupération d'énergie est un moyen d'assurer cette autonomie. La ***récupération d'énergie*** se base sur l'exploitation d'au moins une des six grandeurs physiques exploitables dans un environnement standard : *mécanique* (déplacement, force, masse, débit, etc.), *thermique* (température, capacité thermique, flux thermique, etc.), *électrique* (courant, tension, charge, impédance, diélectrique, etc.), *magnétique* (champ magnétique, perméabilité, moment magnétique, etc.), *radiative* (lumière visible, rayons X, micro-ondes, etc.), et (*bio*) *chimique* (humidité, gaz, sucre, hormones, etc.). Nous avons mené une étude visant à déterminer le ratio de l'apport énergétique au SWaP des récupérateurs

d'énergie à mettre en place. Il s'avère que le milieu dans lequel nous nous trouvons n'est pas propice à la récupération d'énergie de manière suffisamment efficace pour plusieurs raisons : il s'agit en premier lieu de l'inconstance des grandeurs physiques de l'environnement du système (fréquence de vibration irrégulière, variations de température, peu d'éléments radiatifs exploitables, etc.) ; en second lieu, le rendement des moyens de récupération d'énergie au regard de nos besoins électriques pour une chaîne d'acquisition est généralement très faible. Dans notre cas d'application, l'autonomie en énergie n'est donc pas une piste fiable à exploiter à l'heure actuelle.

L'ensemble des méthodes de diagnostic présentées précédemment ont notamment pour point commun leur implémentation dans un système « bouclé ». Ors les chaînes d'acquisition capteur sont des systèmes en boucle « ouverte » puisque les données d'entrées ne sont pas définies par l'opérateur ni le système. Par conséquent, la mise en œuvre de solutions adaptées dont les résultats peuvent assurer le niveau de *sûreté de fonctionnement* requis est très complexe.

Enfin, le troisième point bloquant est le niveau de connaissance du système et de son environnement de fonctionnement. En effet, la première difficulté du concepteur est de maîtriser le fonctionnement du système à concevoir, la difficulté croissant exponentiellement avec la complexité du système. De ce fait, l'environnement dans lequel est plongé le système nécessite, lui aussi, d'être correctement défini et connu. A ce jour, la modélisation d'un environnement aéronautique sévère (vibrations, variations de température, champs électromagnétiques, bombardement neutronique, etc.) n'est pas encore à la portée de nos connaissances et les moyens à mettre en œuvre pour ce faire seraient colossaux.

D.5. Synthèse

Pour résumer cet état de l'art de la détection et du diagnostic de défauts, notamment dans l'aéronautique, il existe de nombreuses théories dont une majeure partie se trouve être implémentée dans des environnements laboratoires (i.e. sans aucune contrainte extérieure).

Quel que soit le domaine d'application, la majorité des auteurs dissocient les moyens de détection de défauts des méthodes d'identification et de diagnostic de défauts. Dans le cas de la détection, il apparaît une différenciation entre la perception de changement lors de l'analyse du signal (seuil, gradient, spectre, etc.) et l'utilisation d'un modèle mathématique pour la génération de résidus. Dans le cas des modèles de diagnostic, trois tendances majeures reviennent systématiquement :

- L'estimation d'état par une représentation mathématique fine du système, qui nécessite une meilleure connaissance pour parvenir à des résultats plus performants, mais nécessitant une puissance de calcul plus importante
- L'estimation de paramètres du modèle à surveiller, qui nécessite un niveau de connaissance du système légèrement moindre, mais dont la plage de variation des paramètres doit être connue pour réduire les temps de calculs
- L'estimation de signal par prédiction qui nécessite de grandes capacités de calculs, difficilement implémentable dans un système embarqué comme notre CAC.

Enfin, cet état de l'art a pu mettre en avant la tendance à l'intégration de fonctions de détection et de diagnostic de défauts principalement dans des systèmes bouclés, négligée il y a encore une quinzaine d'année.

E. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de présenter notre problématique qui est l'élaboration d'une CAC plus robuste, ainsi qu'une définition des systèmes aéronautiques critiques et de l'état de l'art de la détection et du diagnostic de défauts. L'étude illustre la tendance à l'intégration d'intelligence au sein de systèmes dédiés en aéronautique. Dans le cas des équipements avioniques, cette tendance est soutenue par une volonté politique via les appels à projets européens, les orientations techniques des entreprises de haute technologie dans l'aéronautique, et les travaux des laboratoires de recherche et des organismes de normalisation.

Ainsi, entre les tendances techniques et technologiques, et le SWaP, il apparaît clairement une différence d'objectifs. Dans le premier cas, les systèmes tendent à :

- Intégrer de plus en plus de fonctions complexes
- Exploiter de plus grandes performances de calcul et de stockage
- Miniaturiser les composants utilisés (et par conséquent, augmenter la sensibilité aux perturbations externes)

Dans le second cas, celui de l'aéronautique, les standards et les concepteurs aéronautiques tendent à :

- Réduire la complexité des fonctions embarquées
- Réduire le nombre de systèmes physiques embarqués (pour diminuer la masse et le volume occupés)
- Optimiser la consommation électrique

Par conséquent, il est difficile de suivre ces deux tendances sans faire de compromis.

Les objectifs de nos travaux de thèse visent donc à élaborer une Chaîne d'Acquisition Capteur plus robuste, afin de satisfaire le niveau de disponibilité et d'intégrité conforme à un système aéronautique critique de DAL-A, tout en se conformant aux tendances du SWaP. Pour cela, nous nous proposons de boucler partiellement notre CAC, et d'y intégrer son modèle mathématique afin d'implémenter une fonction de détection, d'identification, et de compensation de défauts. Le fait d'assurer le niveau de disponibilité et d'intégrité demandé permettra notamment de réduire d'une redondance physique ce genre de Chaîne d'Acquisition Capteur.

Chapitre II - Chaîne d'acquisition robuste

II.	Chaîne d'acquisition robuste.....	35
A.	Introduction.....	36
B.	Chaîne d'Acquisition Capteur comme Système Aéronautique Critique	36
B.1.	Le contexte SYRENA	36
B.2.	Besoins et contraintes.....	37
B.3.	Synthèse	39
C.	Défauts ciblés	39
C.1.	Rappels des défauts dans une CAC	39
C.2.	Sélection des défauts à cibler.....	40
C.3.	Synthèse	47
D.	Architecture proposée	47
D.1.	Architecture tolérante aux défauts	47
D.2.	Chaîne d'Acquisition Capteur (CAC)	48
D.3.	Fonction de détection de défauts	48
D.4.	Fonction d'identification de défauts	51
V.	Fonction de gestion de modes	52
VI.	Synthèse	52
E.	Modes de fonctionnement.....	53
E.1.	Mode opérationnel.....	53
E.2.	Mode autotest.....	54
E.3.	Mode d'identification de défauts.....	54
E.4.	Gestion des modes de fonctionnement	55
F.	Sélection de la fonction de détection et d'identification de défauts.....	56
F.1.	Aperçu de la méthodologie proposée	56
F.2.	Caractérisation de la Chaîne d'Acquisition Capteur	56
F.3.	Identification des critères d'évaluation des méthodes de détection et de diagnostic.....	57
F.4.	Quantification des critères d'évaluation	58
F.5.	Synthèse des résultats obtenus.....	58
F.6.	Mise en application du processus	59
VII.	Synthèse	62

A. Introduction

Le contexte aéronautique actuel, tel que présenté dans le chapitre précédent, montre d'une part, les tendances d'augmentation de la sûreté de fonctionnement des équipements critiques et de leurs performances, tout en s'orientant vers une réduction du volume, du poids, et de la consommation électrique de ces mêmes équipements, et d'autre part, les évolutions technologiques vers des systèmes de plus en plus performants et intégrés, quelque fois aux dépens de la fiabilité de ces nouveaux systèmes. Notre cas d'étude porte sur les chaînes d'acquisition de grandeurs physiques (température, pression, couple, et vitesse), et sur les moyens à mettre en œuvre afin d'évoluer conformément aux tendances actuelles.

Dans un premier temps nous rappelons le contexte du projet SYRENA qui est le vecteur d'application des travaux d'études présentés ici. Puis nous analysons les besoins des Chaînes d'Acquisition Capteur (CAC) afin de mettre en évidence les degrés de libertés de ces systèmes pour l'élaboration d'une solution innovante. Dans un deuxième temps, nous détaillons l'impact des défauts de fonctionnement au sein d'une CAC, et identifions les lacunes des systèmes existants qui limitent leur degré de tolérance aux défauts. Dans un troisième temps, nous présentons une nouvelle architecture plus tolérante aux défauts ainsi qu'un ensemble de mode de fonctionnement de cette architecture qui permettent le respect des contraintes aéronautiques et critiques. En dernier lieu, nous présentons un processus pour la sélection d'une méthode d'identification des défauts dans l'optique de l'intégrer à une fonction de surveillance de la CAC à base de modèle mathématique.

B. Chaîne d'Acquisition Capteur comme Système Aéronautique Critique

B.1. Le contexte SYRENA

Le projet SYRENA, pour SYstème de REGulation Nouvelle Architecture, est un projet d'étude technique piloté par TURBOMECA et le consortium Aerospace Valley. Ce projet d'envergure nationale d'une durée de trois ans regroupe 27 partenaires et acteurs du domaine de l'aéronautique et des laboratoires de recherche.

Ce projet a pour objectif de :

- créer une dynamique commune d'innovation et d'orientations technologiques entre ses partenaires ;
- préparer l'émergence des technologies « automotive » (ex : utilisation de capteurs bas coût, mais plus fiables et plus légers) pour une mise en œuvre dans le domaine de l'aéronautique ;
- repenser l'architecture du système de régulation sous un aspect plus modulaire, afin d'améliorer sa flexibilité par rapport aux besoins de performances et d'exigences de coût.

L'ensemble des innovations, illustrées par la Figure II-1, élaborées au sein du projet sont développées sous forme de prototypes, ceux-ci étant intégrés au Banc d'Intégration Système (BISR) de TURBOMECA. D'un point de vue technique, l'objectif principal du projet SYRENA se traduit par la proposition d'une nouvelle architecture de contrôle santé-moteur, à travers l'optimisation des moyens de contrôle moteur (actionneurs, moteurs électriques, et capteurs) et des connectiques autour de l'unité de calcul (FADEC dans notre cas). L'idée est de réduire au maximum la quantité de câbles tout en standardisant les connectiques autour de l'unité de calcul.

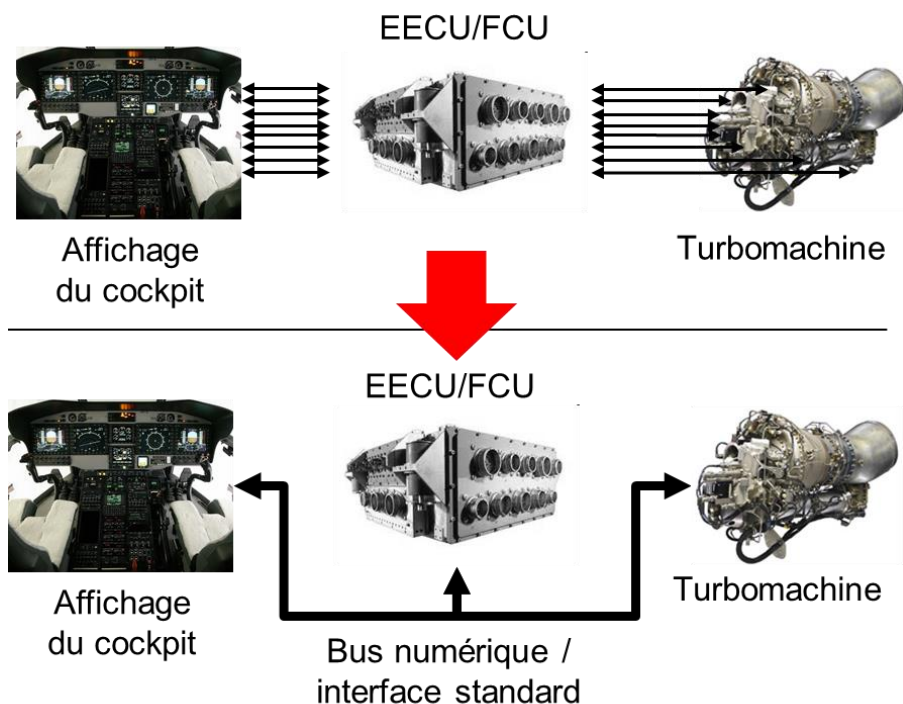


Figure II-1. Objectifs d'innovation du projet SYRENA

A plus long terme, SYRENA s'inscrit dans une dynamique d'amélioration de la maintenabilité du système de régulation dont la dépose à un impact significatif en termes de temps, de coûts, et de complexité.

Les objectifs de nos travaux de recherche visent à assurer l'intégrité des données de mesure, la disponibilité de la mesure, ainsi que le maintien du niveau de sûreté de fonctionnement actuel de systèmes aéronautiques critiques. De ce fait, le projet SYRENA nous apporte les contraintes de conception et le cahier des charges techniques comme cas d'application des théories à développer et à mettre en œuvre.

B.2. Besoins et contraintes

B.2.1. Introduction : intérêt d'une analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle de la Chaîne d'acquisition Capteur permet la mise en évidence des fonctionnalités à intégrer ainsi que les contraintes techniques auxquelles nous devons faire face. La CAC doit donc intégrer à la fois une chaîne de conditionnement et de mise en forme du signal classique, ainsi qu'un moyen de détection de défauts, une fonction d'identification du (des) défaut(s), et une fonction de compensation de ces défauts. Afin d'assurer l'aspect concret de notre analyse, les exigences de la CAC sont issues du Cahier des Charges Fonctionnel des chaînes d'acquisition du projet SYRENA. Nous avons réalisé une **Analyse Fonctionnelle** et identifié les principales Fonctions de Service (FS) et Fonctions de Contrainte (FC) de notre cas d'application : le système de régulation d'une turbomachine d'hélicoptère.

B.2.2. Liste des exigences

Afin de réaliser une analyse fonctionnelle fiable, notre étude se base sur les contraintes, et les exigences techniques et technologiques exprimées pour l'ensemble des chaînes d'acquisition de grandeurs physiques du projet SYRENA. **Pour des raisons de confidentialité, le tableau de synthèse des exigences et contraintes ne peut être présenté dans ce manuscrit.** A partir de ce tableau, nous avons extrait deux points déterminants quant aux contraintes et exigences d'une CAC. En premier lieu, le niveau de fiabilité est relativement élevé pour ce type de mesure réalisée dans les conditions données. En second lieu, les contraintes de disponibilité et d'intégrité demandées ne nécessitent pas une gestion temps réel, ce qui les rend plus facilement abordable dans notre problématique. En effet, ces tolérances nous permettront d'intégrer plus facilement un moyen de compensation de mesure dans un microcontrôleur moins performant en termes de calcul, et par conséquent plus robuste par rapport à son environnement.

B.2.3. Résultats de l'Analyse du Besoin

Cette étude préliminaire nous permet d'identifier les 4 services principaux de notre nouvelle CAC : *l'acquisition d'une grandeur physique* (température, pression, vitesse, ou couple), *l'utilisation des moyens de protection* usuels dans l'aéronautique (blindage, zone d'environnement moins sévères, etc.), la *non-intrusivité en cas de pannes ou de casse*, et l'apport d'un *diagnostic de pannes et d'intégrité* de la CAC.

- Objectifs
 - FS1 : Acquérir une grandeur physique
 - FS2 : Bénéficier des protections des éléments externes
 - FS3 : En cas de pannes ou de casse ne pas perturber le moteur
 - FS4 : Fournir un diagnostic d'intégrité et de pannes
- Contraintes
 - FC1 : Se fixer au bloc moteur
 - FC2 : S'adapter à l'alimentation électrique du système
 - FC3 : Résister à l'environnement externe
 - FC4 : Respecter les exigences de la sûreté de fonctionnement
 - FC5 : Prendre en compte les objectifs de coûts
 - FC6 : Faciliter la pose/dépose
 - FC7 : Comptabiliser les cycles de bon fonctionnement/de défauts

De manière générale, les *fonctions de contraintes* énoncées ici convergent avec les tendances de conception dans l'aéronautique présentées dans le chapitre 1. Par exemple, les FC2 et FC6 tendent vers une standardisation de la CAC. Les FC3 et FC4 correspondent aux exigences d'un système critique en environnement sévère. La FC5 prend en compte les exigences de

coûts, en effet proposer une nouvelle CAC intégrant plus de fonctionnalités et un meilleur degré de disponibilité et d'intégrité qui couleraient 10 fois plus cher n'aurait pas beaucoup de sens (et encore moins de mise en application !). Enfin, la FC7 oriente la conception de la CAC vers une aptitude de **pronostic de pannes**, ce qui facilitera la mise en place ultérieure de **maintenance curative** (voir chapitre 1). La FC1 prédispose la CAC à une intégration plus locale de sa chaîne de traitement par rapport à l'état actuel où les fonctions de traitement sont intégrées dans les calculateurs. L'ensemble de ces contraintes tendent vers la conception d'une CAC plus intégrée, plus standard, et possédant plus d'aptitudes, faisant ainsi évoluer une CAC classique vers une Chaîne d'Acquisition Capteur « intelligente ».

B.2.4. Bilan

L'identification des **fonctions de services** et des **fonctions de contraintes** met en lumière certaines embûches pour la phase de conception de la CAC. Effectivement, l'ajout de fonctions de détection et de diagnostic de défaut (FS4) va partiellement à l'encontre des **fonctions de contraintes** qui garantissent le niveau de **sûreté de fonctionnement** requis pour un système critique aéronautique. Par conséquent, il est nécessaire de proposer une architecture pouvant concilier ces deux problématiques. Ainsi, nous orientons notre solution vers le groupement de plusieurs fonctionnalités permettant le respect du Cahier des Charges Fonctionnel qui nous est donné.

B.3. Synthèse

Le projet SYRENA, vecteur d'application de nos travaux de recherche, ainsi que la rapide analyse du besoin présentée ci-dessus, mettent en évidence les apports nécessaires en termes d'intégration d'intelligence au sein des systèmes aéronautiques critiques, et notamment de la CAC. Nous avons identifié une nouvelle fonctionnalité à intégrer aux CAC, il s'agit d'une fonction de surveillance localisée au plus proche des capteurs malgré l'environnement très contraint. Présentement, l'idée est donc de mettre en œuvre une redondance analytique tout en proposant une évolution de l'architecture actuelle des CAC. Pour ce faire, la fonction de surveillance doit être apte à détecter et à identifier les défauts pouvant réduire l'intégrité et la disponibilité de ces CAC.

C. Défauts ciblés

C.1. Rappels des défauts dans une CAC

Dans la partie traitant des chaînes d'acquisition de grandeurs physiques du chapitre 1, nous avons présenté une classification des défauts pouvant y apparaître, comme rappelé Figure I-23. Celle-ci illustre les catégories de défauts répertoriées : **défaut d'utilisation**, **défaut de conception**, et **défaut de fonctionnement**. Un **défaut d'utilisation** correspond à l'apparition d'une anomalie au sein du système, qui a pour cause l'utilisation du système en dehors des conditions de fonctionnement prévues (par exemple, le dépassement de la plage de température acceptable, ou encore l'envoi d'une commande erronée au système). Un **défaut de conception** est une anomalie due à une erreur ou à un cumul d'erreurs lors du processus de conception ou de reproduction du sous-ensemble. Le processus classique de conception de système aéronautique critique est présenté au sein du chapitre 1, partie 4. Par exemple, l'absence de blindage du système dans un environnement soumis à de fortes contraintes électromagnétiques. Un **défaut de fonctionnement** est une anomalie apparaissant lors de l'utilisation du système, il correspond typiquement à l'usure du système (par exemple, la

modification des propriétés physiques d'un composant lors de son utilisation comme dans la succession des cycles de charge-décharge d'une batterie électrique).

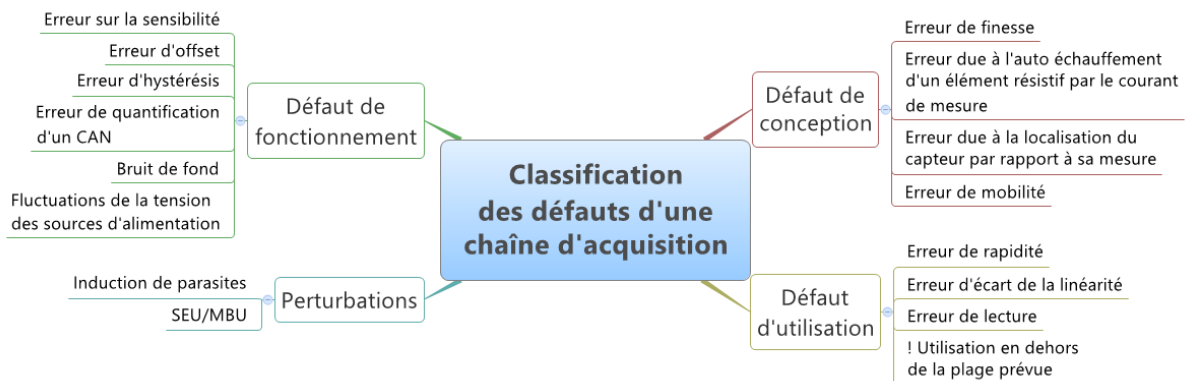


Figure II-2. Classification des défauts d'une chaîne d'acquisition

C.2. Sélection des défauts à cibler

Notre étude se concentre sur les **défauts de fonctionnement** puisqu'ils sont indépendants des actions de l'utilisateur (erreurs humaines par exemple) et sont systématiquement présents au sein des CAC étant donné qu'ils ne dépendent pas des erreurs de conception. D'un point de vue plus technique, ces défauts se présentent sous la forme de défauts abrupts susceptibles de générer une panne franche, et de défauts graduels dépendant du temps et/ou de la température. La température est l'un des phénomènes les plus pénalisants quant au bon fonctionnement des composants électroniques puisqu'elle impacte directement les caractéristiques électriques de ces derniers.

Pour cela, nous avons déroulé une méthode simple visant à quantifier l'impact des défauts majeurs sur le bon fonctionnement de la CAC. La Figure II-3 ordonnance les activités à réaliser, celles-ci se résument par la **sélection**, la **modélisation**, et la **simulation de la CAC et des défauts**, puis **l'estimation de leur impact**.

La sélection de la CAC se base sur le Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF) de l'application visée, c'est-à-dire le projet SYRENA, support des travaux de recherche puisqu'il apporte des données concrètes pour la réalisation du modèle. Les défauts sont sélectionnés à partir des retours d'expériences internes de l'entreprise et des fournisseurs des composants les plus importants. La modélisation de la CAC et des défauts établissent les représentations mathématiques de ces ensembles. La simulation de la CAC et des défauts vise à mettre en avant le comportement de l'entité lors de l'activation des défauts. L'estimation de l'impact permet de cibler quels sont les défauts actuellement non-couverts qui modifient le plus le bon fonctionnement de la CAC.

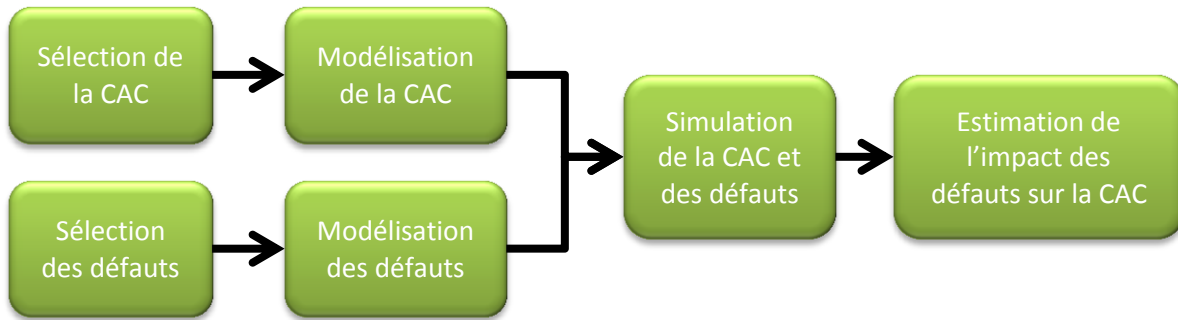


Figure II-3. Processus d'identification des défauts majeurs

1.1.1. Sélection et modélisation de la Chaîne d'Acquisition Capteur

La chaîne d'acquisition capteur témoin sélectionnée est une entité déjà existante et intégrée à un calculateur avionique. L'intérêt de ce choix est d'assurer au maximum la pertinence de l'architecture et des composants utilisés pour l'élaboration de la représentation mathématique de la CAC générique. Ainsi, le Cahier des Charges Fonctionnelles de cette chaîne apporte des données concrètes quant aux règles d'utilisation et aux plages de fonctionnement prévues.

La Figure II-4 illustre le modèle de CAC de test. Cette CAC intègre les blocs fonctionnels suivants :

- Capteur de température ;
- Pont d'adaptation du signal ;
- Etage d'amplification ;
- Convertisseur analogique-numérique.

L'objectif de cette simulation est de quantifier l'impact des défauts et par conséquent nous n'intégrons pas de bruits dus à l'utilisation de la CAC. Le montage « pont diviseur » connecté entre la sonde RTD et l'étage d'amplification permet d'ajouter une aptitude de détection de panne franche au niveau de la sonde RTD. Dans le cas d'un court-circuit, la tension mesurée sera stable et dépendante de la valeur ohmique de R_{ref} . Dans le cas d'un circuit ouvert, la tension mesurée sera dépendante de la valeur ohmique de R_{check} .

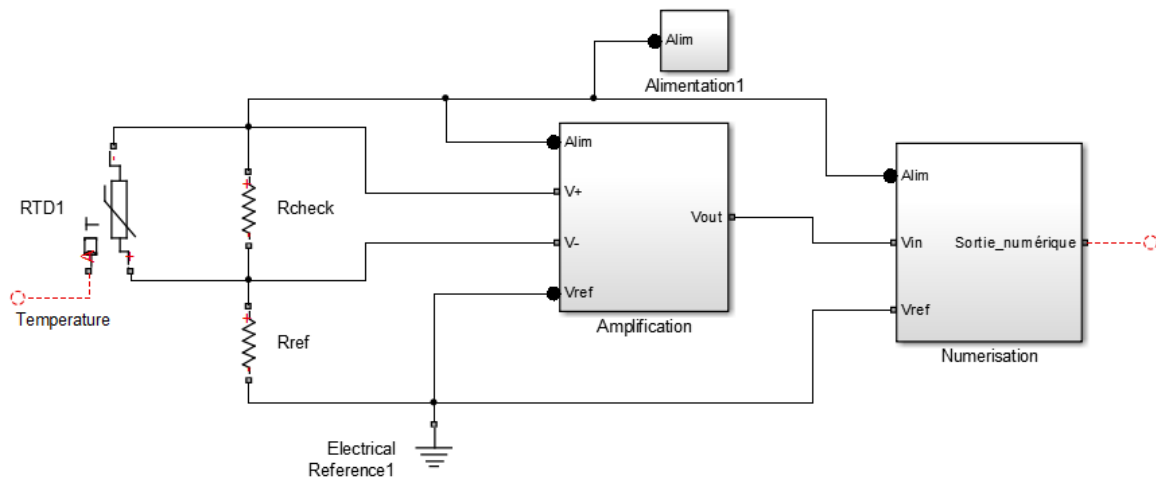


Figure II-4. Illustration de la CAC simulée sans défauts

Le Tableau II-1 regroupe l'ensemble des descriptions des symboles utilisés dans les équations de notre Chaîne d'Acquisition Capteur de test.

Tableau II-1. Table de symboles des équations

Sigle	Elément	Sigle	Elément
R_0 (Ω)	Résistance nominale de la RTD	V_{off} (V)	Dérive d'offset de l'amplification
α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Coefficient de température de la RTD	Δ (\emptyset)	Dérive de gain de l'amplification
T ($^{\circ}\text{C}$)	Température à mesurer	V_{out} (V)	Tension en sortie de l'amplification
I_{exc} (A)	Courant d'excitation	digit_out (bits)	Valeur numérique en sortie du convertisseur A/D
R_{check} (Ω)	Résistance pour la vérification de la présence de la RTD	q_{adc} (V)	Pas de quantification du convertisseur A/D
R_{ref} (Ω)	Résistance pour la détection d'un court-circuit de la RTD ou de R_{check}	Δ_{adc} (\emptyset)	Dérive de gain du CAN
V_p (V)	Tension à la borne positive de l'amplification	FS (V)	Tension pleine échelle du CAN
V_n (V)	Tension à la borne négative de l'amplification	N (\emptyset)	Nombre de bits du CAN
R_{OA1} (Ω)	Résistance de contre réaction de l'amplification	R_{OA2} (Ω)	Résistance de contre réaction de l'amplification
Vout_OA (V)	Tension de sortie de l'étage d'amplification	FS (V)	Valeur pleine échelle en tension du convertisseur analogique-numérique

Le capteur de température utilisé est une sonde platine (RTD) dont l'équation de transfert se représente sous la forme ci-dessous, et les caractéristiques sont présentées en [VAN 25].

$$R_{(T)} = R_0 \times (1 + \alpha(T - T_0)) \quad \text{II-1}$$

L'étage d'adaptation est un pont de diviseur permettant d'assurer une mesure différentielle avec peu de composants, mais dont le comportement du signal demeure non linéaire ainsi que le montre sa représentation mathématique.

$$(V_p - V_n) = I_{exc} \times \frac{R_{check} \times R_{(T)}}{R_{check} + R_{(T)}} \quad \text{II-2}$$

L'amplification se réalise par l'utilisation d'un amplificateur différentiel dont le modèle mathématique idéal équivalent correspond à l'équation I-3.

$$V_{out_OA} = (V_p - V_{ref}) \times \left(1 + \frac{R_{OA1}}{R_{OA2}}\right) \quad \text{II-3}$$

Aujourd'hui, deux types de convertisseur analogique-numérique (CAN) sont principalement utilisés dans le secteur aéronautique, ce sont les CAN sigma-delta et les CAN par approximations successives (SAR). Le CAN sigma-delta est le plus performant en termes de robustesse et de précision de conversion, cependant les paramétrages et calibration de ces composants étant des informations inaccessibles pour nous, notre étude ne peut extraire leur fonction de transfert. Par conséquent, nous nous concentrons sur le second CAN le plus utilisé. La fonction de transfert de ce dernier a été validée par l'élaboration sous Simulink de son architecture, en partie basée sur [BEA 09], ainsi que le présente l'annexe *Architecture du convertisseur A/N de type SAR*. Ainsi l'équation I-4 correspond à la fonction de transfert idéale de la CAC de test, et l'équation I-5 correspond au pas de quantification du CAN.

$$digit_{out} = \left(\frac{V_{out_OA}}{q_{adc}} \right) \quad \text{II-4}$$

Le pas de quantification d'un Convertisseur Analogique-Numérique s'écrit :

$$q_{adc} = \frac{FS}{2^N - 1} \quad \text{II-5}$$

La fonction de transfert idéale de l'ensemble de la Chaîne d'Acquisition Capteur de test se retranscrit de la manière suivante :

$$digit_{out(T)} = \left[(I_{exc} \times \frac{R_{check} \times R_0 \times (1 + \alpha(T - T_0))}{R_{check} + R_0 \times (1 + \alpha(T - T_0))}) \times (1 + \frac{R_{OA1}}{R_{OA2}}) \right] \div q_{adc} \quad \text{II-6}$$

1.1.2. Sélection et modélisation des défauts connus

Nous modélisons deux types de défauts, d'abord les défauts générant des pannes franches (court-circuit, circuit ouvert), puis les défauts graduels, générant des dérives paramétriques (modification des caractéristiques électriques des composants, et notamment le vieillissement). Il est évident que nous ne pouvons modéliser ces deux types de défauts sur l'ensemble des composants de la CAC, car pour cela il faudrait prendre en compte chaque composant de base comme les résistances, capacitances, et inductances telles que représentées dans l'ouvrage [AG 13]. Par conséquent, notre étude se concentre en premier lieu sur une étude des composants d'une CAC et de leurs impacts (une dérive d'offset d'amplification sera plus significative que l'évolution de valeurs ohmiques d'un filtre RC). A partir de retours d'expériences des services de conception systèmes et matériel, ainsi que des services de maintenance, les pannes franches les plus fréquentes se localisent au niveau du pont d'adaptation et de la connectique entre les composants (ces problèmes de *Bonding* lors de la conception des composants étant du ressort du packaging, ils ne sont pas pris en compte).

Dans notre cas d'étude, les pannes franches au niveau du capteur et du pont d'adaptation sont ciblées en priorité puisqu'elles impactent directement sur le bon fonctionnement des fonctions

connectées en aval. Les défauts graduels sont localisés à partir de la fonction de transfert de la CAC qui permet d'identifier les composants les plus impactant en termes de dérives. Ainsi, le Tableau II-2 résume les défaillances simulées, leur nature, et leur localisation.

Tableau II-2. Identification des défaillances simulées

Défaillance	Effet	Composant	Causes les plus probables
Court-circuit	Franc	Capteur Pont d'adaptation	Température et dépôt de corps étranger
Circuit ouvert	Franc	Capteur Pont d'adaptation	Vibrations
Evolution du gain	Dérive	Amplification Conversion A-N	Température et utilisation
Evolution de l'offset	Dérive	Amplification Conversion A-N	Température et utilisation

Les défauts francs sont modélisés comme le montre la Figure II-5; ils correspondent à la rupture d'un circuit et/ou d'une connectique ou bien à l'apparition d'un court-circuit. Dans notre simulation, les ruptures de circuit équivalent à une impédance très élevée, tandis que les court-circuit ramènent l'impédance à une valeur ohmique pratiquement nulle. Le signal de commande évolue sur trois niveaux qui sont : pas de défauts, court-circuit, et circuit ouvert.

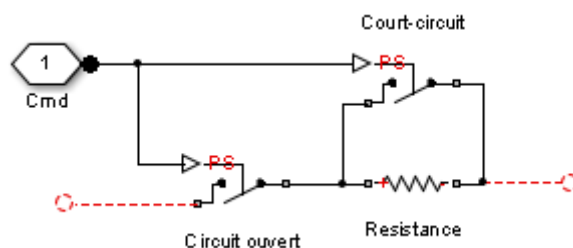


Figure II-5. Principe d'injection de pannes franches

L'injection des dérives paramétriques au sein de l'étage d'amplification se met en œuvre telle que l'illustre la Figure II-6. L'offset correspondant à une variation de la tension d'entrée entre les bornes positive (V_p) et négative (V_n) de l'amplification. Le gain se modélise par l'évolution des valeurs ohmique du circuit de contre-réaction, même si l'étude [MAR 12] que nous avons publié montre que dans ce type de montage, l'évolution du gain n'impacte pratiquement pas la contre-réaction. Ainsi l'équation ci-dessous correspond au fonctionnement de cet étage en intégrant les dérives de gain (Δ_{adc}) et d'offset (V_{off_OA}).

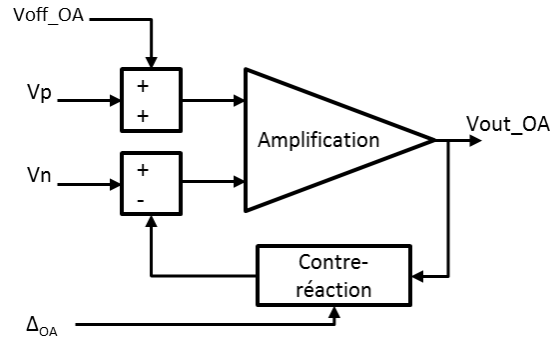


Figure II-6. Etage d'amplification avec dérives paramétriques

$$V_{out_OA} = (V_{off_OA} + V_p - V_n) \times \left(1 + \frac{R_{OA1}}{R_{OA2}} \times \Delta_{OA}\right) \quad \text{II-7}$$

La modélisation des dérives paramétriques au sein de l'étage de numérisation est réalisée par l'injection d'un offset en entrée et par l'injection d'un coefficient multiplicateur sur le signal de sortie numérique, ainsi que le montre la Figure II-7. L'offset d'entrée est dû à la fonction d'échantillonnage-blocage, tandis que la dérive du gain apparaît avec le vieillissement du convertisseur. Ainsi, l'équation 8 correspond à la représentation mathématique du CAN, intégrant les dérives de gain (G_{adc}) et d'offset (V_{off_adc}).

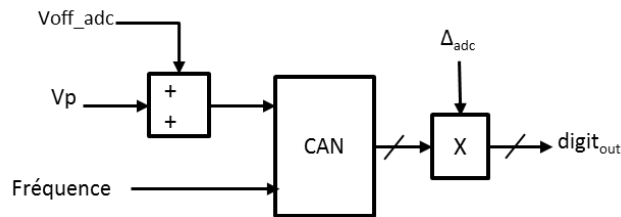


Figure II-7. Etage de numérisation avec dérives paramétriques

L'équation ci-dessous correspond au modèle mathématique du convertisseur analogique-numérique.

$$digit_{out} = (q_{adc} \times (V_{out_OA} + V_{off_adc})) \times \Delta_{adc} \quad \text{II-8}$$

1.1.3. Simulation de la CAC avec injection des défauts

La Figure II-8 représente le modèle de simulation de la CAC illustrée en Figure II-4 intégrant les défauts de fonctionnement de type « pannes franches » et « dérives paramétriques ».

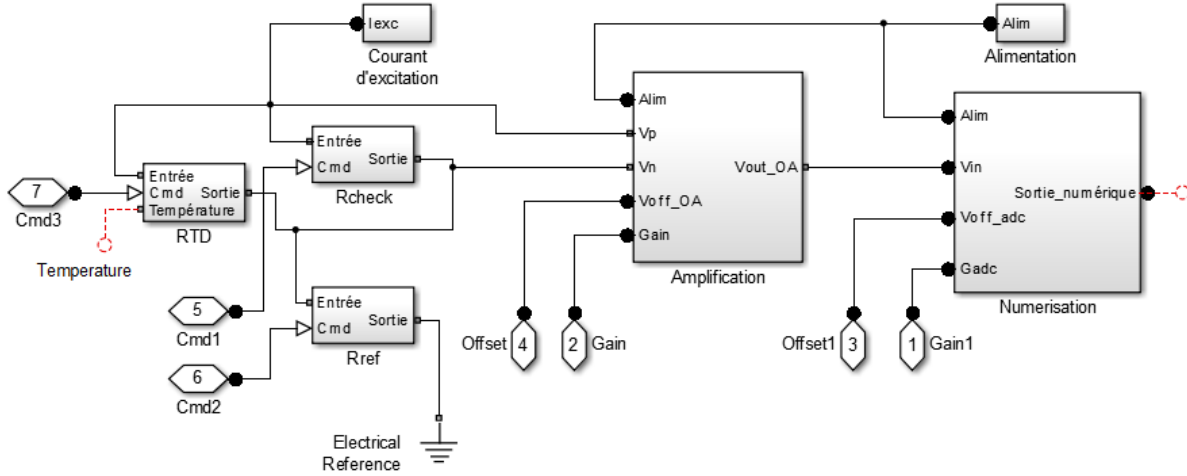


Figure II-8. Illustration de la CAC simulée avec défauts

Les blocs R_{check} et R_{ref} correspondent à la Figure II-5, le bloc d'amplification intègre le modèle illustré par la Figure II-6, et le bloc de numérisation se modélise par la Figure II-7. Les injections de défauts de type dérive paramétrique (entrées 1 à 4) sont mises en œuvre ainsi que le montre les Figure II-6 et Figure II-7, tandis que les pannes franches (entrées 5 à 7) sont des signaux de commande sur trois niveaux (pas de défaut, court-circuit, circuit ouvert). Afin de conserver un maximum de lisibilité lors des simulations, les défauts sont injectés unitairement. Ainsi, la fonction de transfert intégrant les dérives de gain et d'offset des étages d'amplification et de numérisation de la CAC se retranscrit de la manière suivante :

$$digit_{out(T)} = (I_{exc} \times \frac{R_{check} \times R_{(T)}}{R_{check} + R_{(T)}} + V_{off_OA}) \times \left[\left(1 + \frac{R_{OA1}}{R_{OA2}} \times \Delta_{OA} \right) + V_{off_adc} \right] \times \frac{\Delta_{adc}}{q_{adc}} \quad \text{II-9}$$

1.1.4. Estimation de l'impact des défauts connus

Les dérives paramétriques ponctuelles ou à long termes sont des défauts qui impactent directement sur le niveau de sûreté de fonctionnement du système. En effet, elles dégradent les performances de l'entité critique et peuvent masquer la perte d'intégrité des données traitées. Or, une information erronée et transmise est considérée comme beaucoup plus dangereuse qu'une information exploitable mais classée comme non-intègre (donc non exploitable). Les pannes franches qui impactent le plus le bon fonctionnement du système se retrouvent également au sein de l'étage d'adaptation du signal, celles-ci sont plus évidentes à détecter sur le signal de sortie. En effet, le signal de sortie de la CAC ira saturer l'amplificateur utilisé ou bien délivrera une tension nulle ainsi que nous le présentons dans

notre publication [MAR 12a]. Les travaux présentés lors de cette conférence mettent l'accent sur l'impact des défauts francs sur une CAC aéronautique et critique, ainsi que sur l'absence de moyen de détection des défauts glissants. Les travaux que nous avons présentés en conférence via l'article [MAR 13], présentent l'impact non négligeable de la température sur le bon fonctionnement d'une CAC classique, à travers ses effets de dérives sur cette dernière.

C.3. Synthèse

Les systèmes de détection actuel effectuent une surveillance du signal, de la détection de franchissement de seuils minima et maxima, jusqu'à la détection de gradients trop importants. Par conséquent le taux de couverture de défauts est faible puisqu'il ne couvre que les pannes franches dont les symptômes ne sont visibles que sur le résultat final du traitement du signal.

Dans notre cas, nous étendons le taux de couverture aux défauts graduels dans les modules de traitement du signal. La solution proposée vise à déterminer les évolutions graduelles des paramètres qui impactent le plus sensiblement l'intégrité du système en plus de celle du signal de sortie. Nous y retrouvons naturellement le suivi des dérives paramétriques dues à l'environnement et leurs conséquences à long terme telles que le vieillissement. Les pannes franches peuvent être détectées en limitant l'utilisation de la plage de fonctionnement de l'étage d'amplification. C'est-à-dire que le signal électrique de sortie ne couvre pas la totalité de la plage de fonctionnement de l'amplificateur. Ainsi une saturation ou un signal pratiquement nul correspondront à au moins une panne dans l'étage d'adaptation.

D. Architecture proposée

D.1. Architecture tolérante aux défauts

A partir de l'étude des défauts à cibler et de l'analyse du besoin de notre cas d'étude, nous orientons notre solution vers la conception d'une architecture de Chaîne d'Acquisition Capteur plus robuste, via l'implémentation d'une aptitude de tolérance aux défauts. Cette nouvelle architecture intègre notamment le modèle mathématique correspondant à la fonction de transfert de la CAC classique, afin d'assurer la détection, l'identification, et la compensation de certains défauts les plus impactant. A ces fonctions, nous y intégrons également une interface plus standard (numérisation de la donnée, état de fonctionnement de la CAC) permettant ainsi de compléter l'intégration d'intelligence proche du capteur.

La Figure II-9 présente l'agencement des blocs fonctionnels à intégrer afin de mettre en œuvre une Chaîne d'Acquisition Capteur tolérante aux défauts, et donc plus robuste. Les fonctions en orange correspondent à la Chaîne d'Acquisition Capteur classique telle que présentée dans le chapitre 1, c'est-à-dire de l'acquisition jusqu'à la numérisation de la mesure. Le bloc en rouge est une fonction de gestion des différentes fonctionnalités intégrées au contrôleur (bleu transparent). Nous retrouvons en vert la fonction de détection de défauts, et en violet la fonction d'identification de défauts.

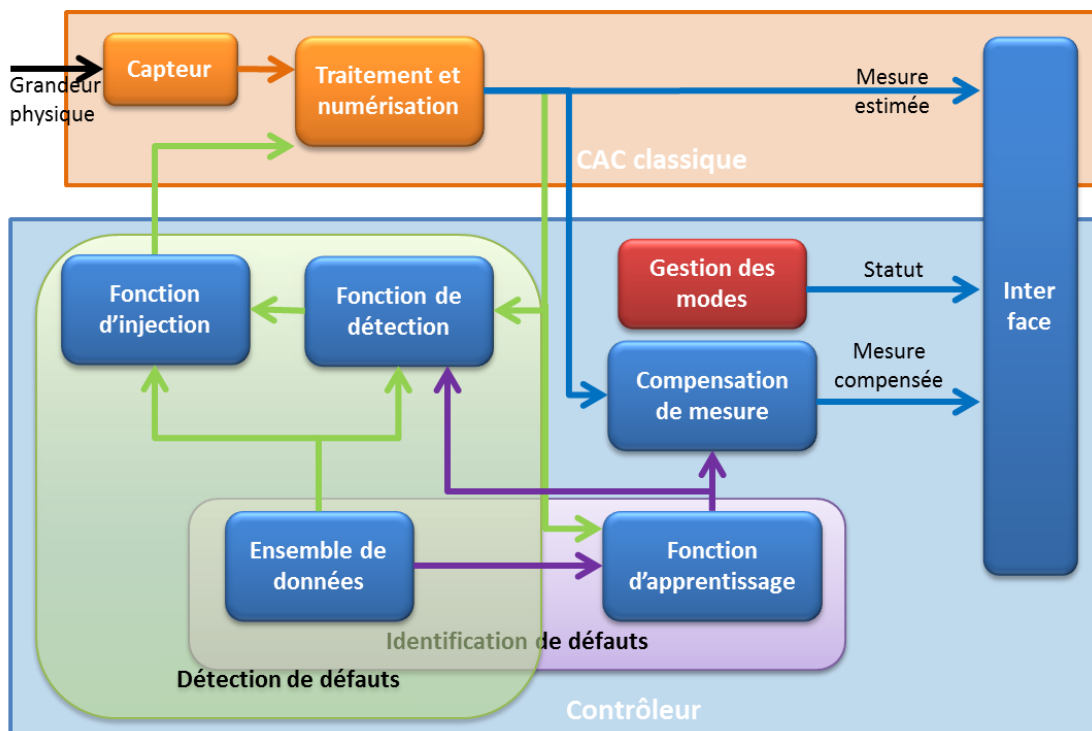


Figure II-9. Nouvelle architecture de Chaîne d'Acquisition Capteur

D.2. Chaîne d'Acquisition Capteur (CAC)

Le bloc de Chaîne d'Acquisition Capteur se compose de fonctions de mise en forme, de traitement du signal, de numérisation, ainsi que d'une entrée pour l'injection de données de test, tel que le présente la Figure II-10. D'avantage de précisions quant aux chaînes d'acquisition sont introduites dans le chapitre 1.

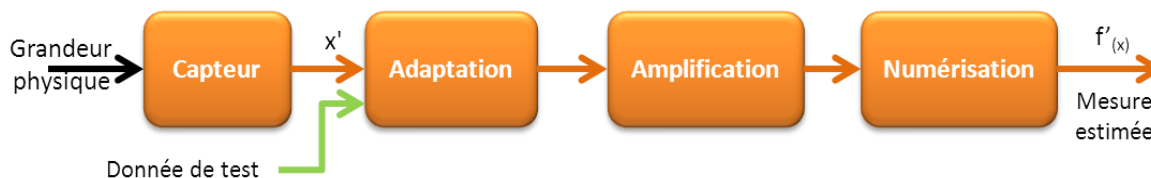


Figure II-10. Chaîne d'Acquisition Capteur avec injection de donnée de test

D.3. Fonction de détection de défauts

Le bloc de détection de défauts se compose d'une *base de données* de test, d'une *fonction d'injection* de ces données de test, et d'une *fonction de détection de défauts*. Cette fonction de détection de défauts intègre à la fois le *modèle mathématique*, la *génération de résidus* entre les données reçues après injection et les données attendues, et un *bloc de décision* qui permet de valider ou non l'apparition d'un défaut.

D.3.1. Principe de la détection

Ainsi que l'illustre la Figure II-11, lors de l'activation de la fonction de détection de défauts, un jeu de données spécifique et connu est injecté dans la chaîne d'acquisition (partie traitement et numérisation, et donc sans le capteur) et l'image du jeu de données attendues est

générée en sortie du bloc de génération de résidus. La réponse de la fonction de décision se base sur le franchissement, par la valeur du résidu, d'un seuil prédéfini.

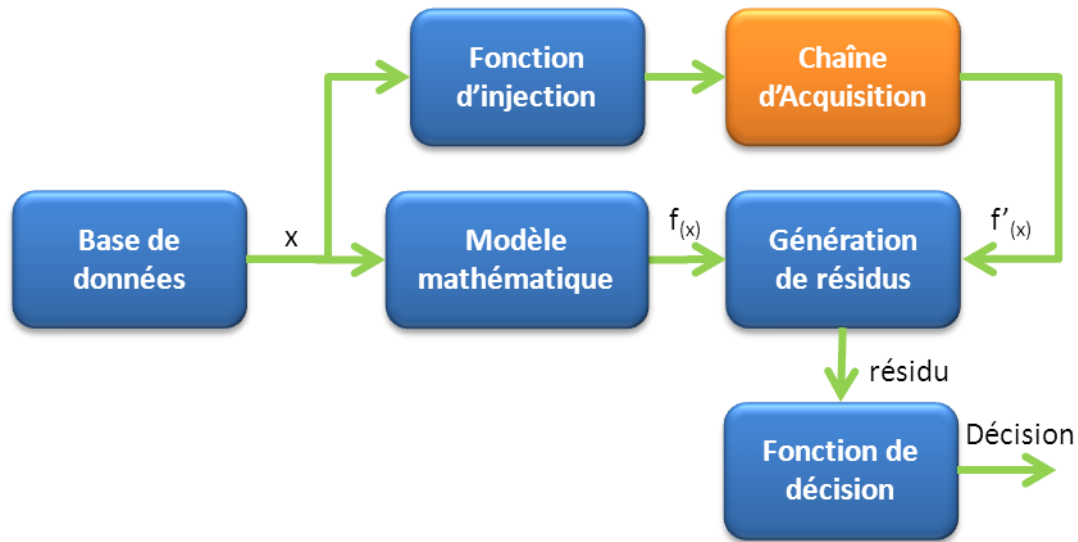


Figure II-11. Fonction de détection de défauts

D.3.2. Moyens d'injection de signaux analogiques

Le besoin d'intégrer un moyen d'injection fiable apparaît suite au rebouclage sur la chaîne d'acquisition, celui-ci se doit d'être le moins intrusif possible et de garantir l'intégrité du signal transmis. Ainsi, l'étude menée sur les moyens d'injection de signaux analogiques maîtrisés a permis d'identifier diverses manières de mise en œuvre. Associés à un étage de conversion numérique analogique, il serait possible d'utiliser un coupleur [GON 13], un mélangeur, ou encore un commutateur [COR 09].

Un **coupleur de signal** permet de coupler (recombineur de puissance) plusieurs signaux de différentes lignes sur une seule sortie, ou bien de diviser (diviseur de puissance) un signal électrique d'une seule ligne en plusieurs signaux sur différentes lignes [RUM04]. Il existe plusieurs types de coupleurs tels que les coupleurs de Wilkinson, les coupleurs de Lange, ou encore les coupleurs en anneaux. Un **montage amplificateur** du type « sommateur inverseur » ou bien « amplificateur soustracteur » sont des moyens de combiner les signaux électriques sans interruption physique du signal en provenance du capteur. Enfin il est possible d'utiliser un **commutateur** dont l'entrée sera positionnée alternativement vers le capteur ou le signal analogique de test. Certaines technologies peuvent répondre à notre besoin, notamment les commutateurs à base de transistors.

Les moyens d'injection présentent pour point commun la nécessité de convertir le signal de référence du domaine numérique au domaine analogique. Pour cela, l'intégration d'un Convertisseur Numérique/Analogique (CNA) est la solution préconisée.

Une seconde opportunité mériterait d'être approfondie, il s'agit de l'utilisation de sortie LVDS couplée à un élément de filtrage passif, comme moyen de transformation de données numériques en un niveau analogique équivalent. Ce type de sortie est présente dans la plus part des FPGA utilisés dans le domaine aéronautique et compenserait l'absence d'un CNA supplémentaire pour le rebouclage.

Le Tableau II-3 synthétise les moyens identifiés, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Chacun de ces moyens d'injection a été identifié à la fois par la littérature et les retours d'expériences en interne.

Tableau II-3. Synthèse des avantages et des inconvénients des moyens d'injection identifiés

Moyens d'injection	Coupleur	Additionneur	Commutateur
Avantages	• Continuité du signal	• Continuité du signal	• Bonne durée de vie
	• Eléments simples	• Bonne durée de vie	• Élément simple
	• Isolation galvanique	• Peu volumineux	• Peu de bruit
	• Peu de bruits		
	• Phases synchrones		
Inconvénients	• Faible durée de vie en environnement sévère	• Défauts quantifiables	non • Discontinuité du signal
	• Volumineux	• Ajout de bruits	• Prise en compte du rebond de commutation
		• Forte intrusivité due aux résistances du montage	• Ajout d'une commande

Parmi l'ensemble des moyens d'injection étudiés, le **commutateur** est l'option la plus simple à réaliser malgré la discontinuité du signal lors de l'injection de données de test, et étant donné que le coupleur est un élément trop fragile pour l'environnement de fonctionnement, et que l'utilisation d'un additionneur augmente le nombre de composants complexes, donc les probabilités de défauts, potentiellement non détectables. Enfin, il est envisageable d'intégrer une sécurité assurant que la commande soit effective, comme par exemple l'intégration d'un signal supplémentaire (équivalent d'un BUSY) correspondant à l'exécution de la commande, ou encore l'intégration d'un comportement spécifique du signal de référence injecté.

D.3.3. Fonction de décision

La **fonction de décision** est réalisée à partir de la précision définie au sein du CdCF, (ex : $\pm 1^\circ\text{C}$ pour une plage de température entre -50°C et $+130^\circ\text{C}$). Notre fonction de décision nécessite donc d'intégrer les variations tolérables pour l'ensemble de la plage de mesure en équivalent binaire. La valeur du seuil de décision se calcule à partir de l'écart maximal en sortie de la CAC, pour une valeur de variation spécifiée dans le CdCF (ex : $\pm 1^\circ\text{C}$) sur l'ensemble de la plage de fonctionnement.

Dans le cas de l'utilisation d'un capteur dont la variation de la valeur de sortie n'est pas constante sur l'ensemble de la plage de mesure (ex : sonde RTD), il est nécessaire de déterminer quel seuil du minimum ou du maximum il est plus intéressant de prendre en compte. Dans le cas du minima, le défaut sera détecté plus tôt puisque le seuil de franchissement sera plus faible, cependant le taux de fausses alarmes est proportionnellement augmenté. Dans le cas du maxima, le défaut sera détecté plus tardivement et le rapport signal/bruit (SNR) sera mieux optimisé.

D.4. Fonction d'identification de défauts

D.4.1. Principe de l'identification de défauts

La *fonction d'identification de défauts* vise à recalculer la valeur des paramètres surveillés de la fonction de transfert qui ont évolué. Pour pouvoir mettre à jour ces paramètres intégrés au modèle mathématique de la CAC. Celui-ci étant utilisé par les fonctions de détection et de compensation de défauts. La fonction d'identification de défauts se compose du modèle mathématique de la Chaîne d'Acquisition, de la même base de données que pour la fonction de détection, et nécessite les données de test de sortie de la Chaîne d'Acquisition. Ainsi que le présente la Figure II-12, la fonction d'apprentissage acquiert les données de test (x_1, x_2, x_n) et leur image issue de la Chaîne d'Acquisition réelle (fx_1, fx_2, fx_n), et délivre le statut de recherche (pas de solution, en cours de traitement, solution trouvée), et les nouveaux paramètres lorsqu'ils sont identifiés.

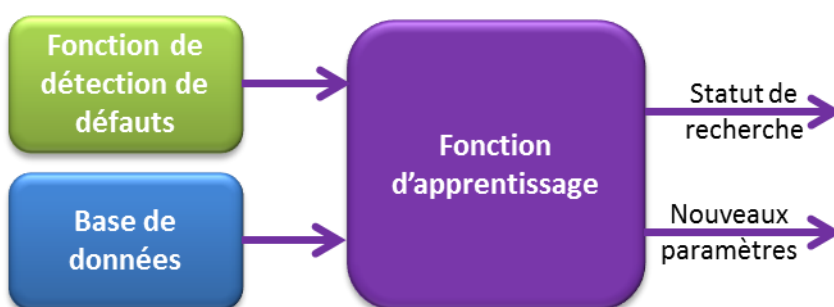


Figure II-12. Fonction d'identification de défauts

Pour des raisons de *déterminisme*, la fonction d'identification ne doit pas excéder une certaine durée afin d'assurer son bon fonctionnement c'est-à-dire que le temps d'exécution alloué à la fonction d'apprentissage est maîtrisé. Ainsi nous nous assurons de deux éléments qui sont que la fonction ne « tombe » pas dans une boucle infinie qui risque d'occuper indéfiniment les ressources de calcul, et que si aucune solution n'est identifiée dans le temps imparti, alors nous considérons la recherche comme un échec. Par conséquent, cet échec se traduit par l'évolution d'au moins un paramètre au-delà des seuils tolérables ou bien d'une dérive anormalement élevée qui correspondrait à plutôt à un défaut franc ayant apparu sur un élément non surveillé (circuit ouvert ou court-circuit par exemple). Une fois les données de test de sortie acquise, la fonction d'identification de défauts rend à nouveau disponible la chaîne d'acquisition pour que celle-ci puisse continuer à fournir des données de mesure aux unités connectées en aval de notre Chaîne d'Acquisition Capteur.

Par la suite, nous présenterons une procédure de sélection de méthode d'identification de défauts afin de l'adapter et de l'intégrer comme fonction d'apprentissage.

D.4.2. Fonction de compensation de défaut

La *fonction de compensation de défaut* a pour objectif de proposer une valeur de mesure de la grandeur physique qui prend en compte les dérives apparues dans la chaîne de traitement et de numérisation. Cette fonction permet de proposer au calculateur une seconde valeur de la grandeur physique qui est considérée comme plus fiable et intègre, puisque tolérante aux défauts. Pour des raisons d'intégrité de la CAC complète, la mesure compensée ne peut en aucun cas remplacer la mesure classique. En effet, l'ajout de fonctionnalités supplémentaires

au sein d'une entité augmente systématiquement le risque de perte de fiabilité et d'intégrité de cette entité.

La Figure II-13 illustre le principe de notre compensation de défauts par l'utilisation du modèle mathématique de la chaîne d'acquisition réelle. Cette fonction se compose du modèle mathématique de la CAC et de son inverse. Le modèle mathématique inverse intègre les derniers paramètres recalculés et acquiert la mesure de la CAC réelle, il vise à recalculer la donnée réelle d'entrée de la CAC en compensant les défauts ayant modifié son comportement. Puis le modèle mathématique normal de la CAC calcule la valeur de la mesure telle qu'elle aurait dû être si les éléments de la CAC réelle n'avaient pas subi de dérives paramétriques.

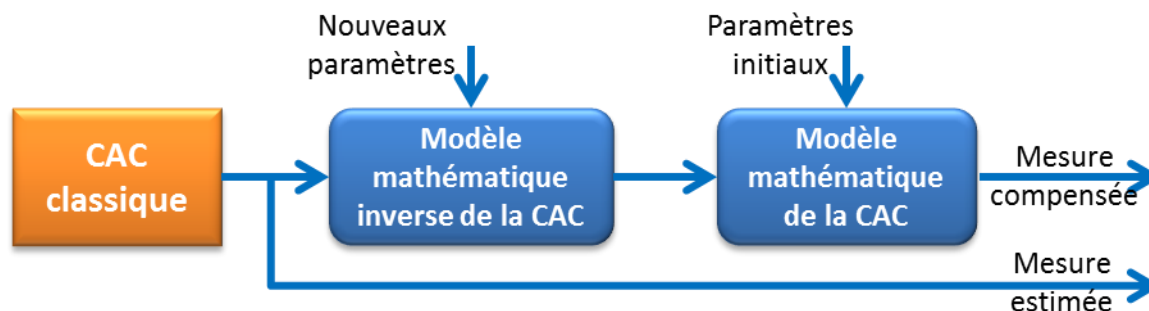


Figure II-13. Fonction de compensation de défauts

V. Fonction de gestion de modes

Afin de coordonner correctement l'ensemble des fonctions présentées, nous avons implémenté un module de gestion des modes. Ce module assure la gestion de l'interface de notre CAC à travers la mise à jour fréquente de la mesure estimée (fréquence définie par le CdCF), l'envoi de notification du statut de la CAC (opérationnel, performances dégradées, en panne), ainsi que la communication de la mesure compensée synchronisée avec la mesure estimée. La Figure II-14 schématise les liens entre le module de gestion des modes et les fonctions principales mises en œuvre (détection, identification, compensation, et l'interface de manière générale).

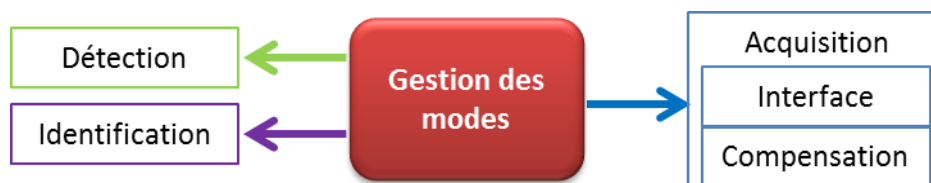


Figure II-14. Fonction de gestion des modes

VI. Synthèse

L'ensemble des blocs fonctionnels présentés dans ce sous-chapitre regroupe les fonctions permettant de mettre en œuvre une chaîne d'acquisition capteur plus tolérante aux défauts. Cependant l'implémentation et l'utilisation de ces fonctions s'avère très contrainte par le CdCF de notre système critique. Afin de respecter les contraintes et les besoins identifiés, nous intégrons des **modes de fonctionnement** qui exploitent chacun une ou plusieurs fonctions (acquisition, détection, identification, compensation), un seul mode étant actif en simultané. De ce fait, une seul mode de fonctionnement peut être actif à la fois, ils doivent donc être tous cadencés de manière précise par un module dédié.

E. Modes de fonctionnement

Afin de satisfaire au mieux les exigences identifiées par l'analyse fonctionnelle, l'architecture proposée doit intégrer différents *modes de fonctionnement*, c'est-à-dire une fonctionnalité de reconfiguration physique et logicielle locale. Nous avons identifié trois modes distincts, chacun de ces modes utilise notamment des fonctions en commun. Les modes identifiés sont les suivants : mode d'acquisition de la mesure, dit « *mode opérationnel* », qui correspond à la phase d'acquisition et de traitement de la grandeur physique ; le *mode d'autotest* qui correspond à la phase de détection de défauts ; et le *mode d'identification de défauts*, qui permet d'identifier les défauts détectés, et de recalculer la valeur des paramètres. La Figure II-15 illustre l'ordonnancement des différents modes par rapport à l'état estimé de la CAC. Nous y retrouvons le **mode acquisition** (Acq) actif lors des cycles d'acquisition quel que soit l'état de la CAC, le **mode de détection de défauts** (De) actif cycliquement pour la détection des défauts, et le **mode d'identification de défauts** (Id) qui est actif dès lors qu'un défaut est détecté.

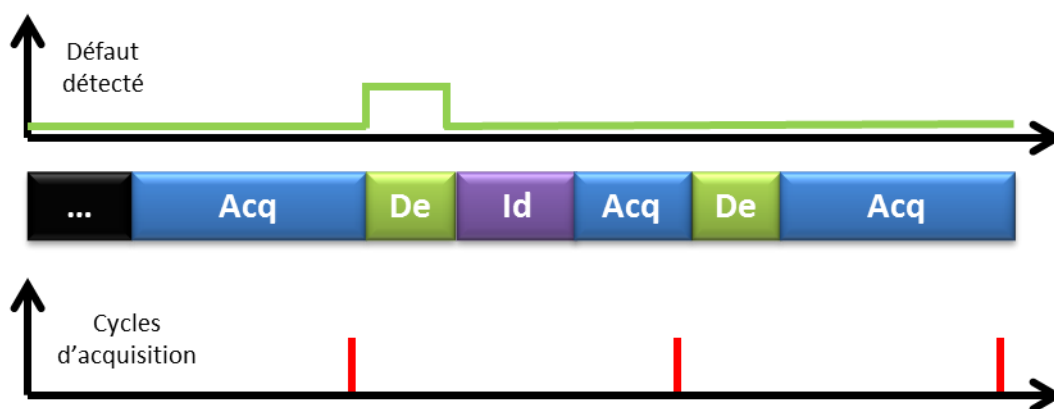


Figure II-15. Gestion des modes de fonctionnement

L'utilisation de modes de fonctionnement permet de respecter le déterminisme et la répartition des ressources de calcul

E.1. Mode opérationnel

Le *mode opérationnel* illustré par la Figure II-16 correspond au fonctionnement d'une chaîne d'acquisition capteur classique, et comprend également la notification du statut de la CAC, ainsi qu'une seconde sortie de mesure.



Figure II-16 Mode Opérationnel

La *mesure estimée* correspond à l'image numérique de la grandeur physique estimée (sortie de la CAC sans traitement supplémentaire), la *mesure compensée* correspond à l'image numérique compensée de la grandeur physique, et le *statut* correspond à l'état du système. La

compensation numérique se base sur l'estimation de paramètres la plus récente et validée par la CAC.

E.2. Mode autotest

Le *mode autotest* correspond à la fonctionnalité permettant de détecter les défauts graduels au sein de la chaîne d'acquisition capteur. Ce mode repose sur le principe d'une chaîne temporairement bouclée, où le système injecte un jeu de *valeurs de références*, récupère cette valeur en sortie de la CAC, et le compare avec les *valeurs attendues* pour obtenir une *décision* (Détection de nouveau défaut), et dans le cas d'une détection effective le mode transmet les *données de test* (entrées injectées et sorties acquises) ainsi que le montre la Figure II-17. La comparaison est induite par une fonction de décision qui tranche entre l'absence de défaut ou du bruit, l'apparition de défauts ou de bruit trop important pouvant réduire l'intégrité de la donnée (image de la grandeur physique mesurée).

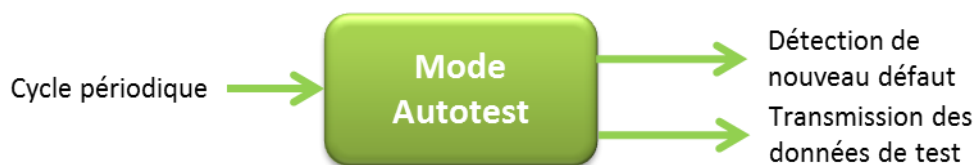


Figure II-17. Mode d'Autotest

Cette fonction a la particularité d'être légèrement intrusive au sein de la CAC puisqu'elle modifie le signal d'entrée durant un bref laps de temps, par conséquent la CAC traite le signal de référence à tester au lieu de l'image de la grandeur physique attendue. La durée maximale de ce mode est relative à la période d'acquisition définie par le CdCf. De plus, la fréquence d'activation de ce mode est dépendante de l'évolution estimée des défauts graduels et du besoin de précision de la détection. Ainsi une fréquence élevée permettra de détecter très tôt les dérives mais interrompra très fréquemment la configuration matérielle d'acquisition (ce qui augmente les risques liés au moyen d'injection du signal de référence), tandis qu'une fréquence d'activation trop faible rendra la perception des dérives comme étant des défauts francs. Pour rappel, les défauts francs sont pris en charge par l'unité de calcul connectée en aval de notre CAC.

E.3. Mode d'identification de défauts

Le *mode d'identification de défauts* consiste en l'intégration d'un algorithme de recherche des paramètres surveillés ayant évolué. Ce mode se déclenche lors de la détection de défauts par le mode autotest. Cette fonctionnalité est illustrée par la Figure II-18 et est activée par la détection d'un nouveau défaut, elle utilise plusieurs *données de test* telles que présentées dans le mode d'autotest, délivre le *jeu de nouveaux paramètres*, et le *succès de l'identification* (ou non). A partir de ce jeu de données, l'algorithme implémenté est apte à déterminer précisément quels sont les paramètres qui ont évolué, en quel sens, et l'amplitude du changement. Deux cas sont possibles lors de l'identification : la réussite ou l'échec. L'identification est considérée comme réussie dès lors qu'un jeu de paramètres est identifié comme étant les valeurs correspondantes des paramètres réels ayant évolués. L'identification est considérée comme un échec lorsqu'aucun jeu de paramètres satisfaisant n'a été identifié. C'est le cas lorsque les paramètres réels ont évolué au-delà des limites tolérables, ou bien lorsque le temps de recherche excède une durée prédéfinie. Cette durée correspond au déterminisme, et donc à la « certificabilité », de notre solution.

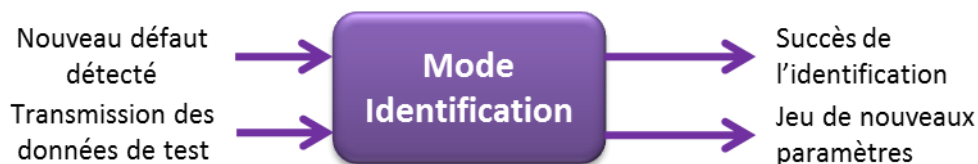


Figure II-18. Mode d'Identification

E.4. Gestion des modes de fonctionnement

Ainsi que le présente la Figure II-19, le mode opérationnel demeure pratiquement omniprésent afin d'assurer la disponibilité de la mesure. Tandis que le mode d'autotest est déclenché périodiquement afin d'assurer la fiabilité de la CAC. Enfin le mode d'identification est sollicité dès qu'un défaut est détecté, et fournit les données nécessaires à la compensation lorsque c'est possible, c'est-à-dire lorsque la CAC n'a pas dérivé au-delà du seuil tolérable et donc que *l'intégrité de la donnée* est préservée.

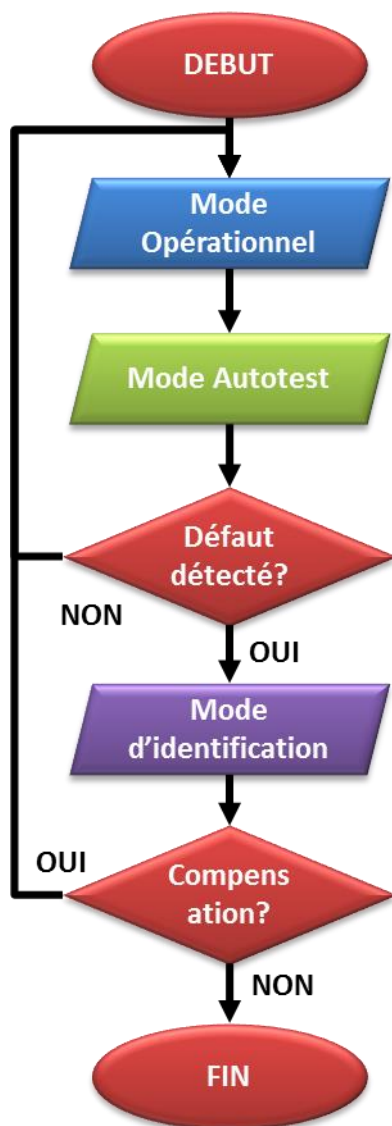


Figure II-19. Diagramme d'ordonnancement des modes

Le mode d'identification intègre un algorithme de recherche de paramètres, il devient nécessaire de sélectionner le ou les algorithmes les plus optimaux au regard de nos besoins et de nos contraintes. Par définition, la méthode d'identification de défauts doit s'orienter sur l'estimation de paramètres et ne pas consommer trop de ressources de calcul ni d'espace mémoire. Le choix sera présenté dans le chapitre 3.

F. Sélection de la fonction de détection et d'identification de défauts

L'objectif de ce processus est de proposer et de mettre en œuvre une fonction pour l'identification et la sélection d'une méthode de diagnostic répondant à un Cahier des Charges Fonctionnels très strict. Notre cas d'application a été présenté dans le chapitre 1, et les sous-chapitres précédents ont mis en lumière certaines exigences vis-à-vis de l'algorithme à sélectionner. Nous y retrouvons notamment *l'identification de paramètres*, les faibles *ressources de calcul, et d'espace de stockage*, la suite des critères étant détaillée un peu plus loin. Pour des informations plus complètes concernant cette méthodologie vous pouvez vous reporter à l'article de conférence DASC 31th [MAR 12a].

F.1. Aperçu de la méthodologie proposée

Le processus de sélection se compose de quatre étapes qui sont la *caractérisation de la CAC*, *l'identification des critères d'évaluation* des méthodes de détection et de diagnostic, la *quantification de ces critères*, et la *synthèse des résultats* obtenus.

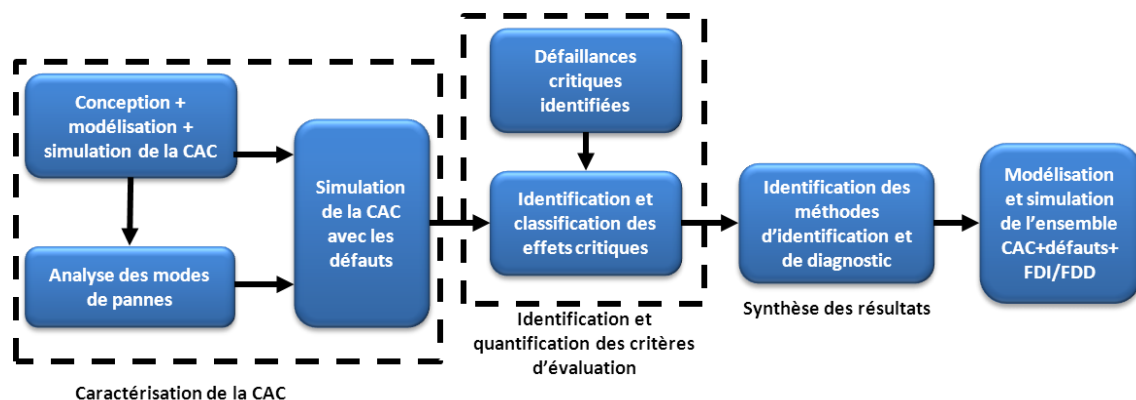


Figure II-20. Aperçu fonctionnel de la méthodologie proposée

F.2. Caractérisation de la Chaîne d'Acquisition Capteur

Le but de cette première étape est de caractériser la CAC à surveiller, en prenant en compte les contraintes et les exigences de conception définies par le Cahier des Charges Fonctionnels. Cette étape permet d'estimer le degré de connaissance de la CAC. De plus, elle rend possible l'identification de certaines défaillances, et ainsi leur impact sur le bon fonctionnement de la CAC.

Par la suite, il convient d'identifier les défaillances pouvant subvenir durant l'utilisation normale du système, c'est-à-dire en conditions d'utilisation et de fonctionnement prévues par le CdCF.

Enfin, à partir des résultats obtenus, l'analyse des effets des défauts sur le système permet d'identifier et de trier les défauts ayant le plus d'impact sur le bon fonctionnement de la CAC, ainsi que la difficulté pour les détecter. Par exemple, une panne franche aura un impact très

fort, cependant un défaut progressif risque de passer inaperçu et diminuer peu à peu l'intégrité des données mesurées. Dans les systèmes critiques, il vaut mieux bloquer une donnée reconnue peu fiable ou intègre, qu'exploiter une donnée erronée.

Dans notre cas d'application, nous simulons notre Chaîne d'Acquisition Capteur dans des conditions de fonctionnement prévues, au regard du CdCF du projet support.

F.3. Identification des critères d'évaluation des méthodes de détection et de diagnostic

La seconde étape sert à regrouper et à synthétiser l'ensemble des critères d'évaluation (ou critères de désirabilité) qui permettront de trier les méthodes de diagnostic existantes par rapport aux besoins exprimés.

Dans le chapitre 1, nous avons mis en avant certains auteurs tels que [VEN 02a], [KAT 05] ayant listé des critères d'évaluation, la liste que nous proposons s'enrichit de quelques critères supplémentaires. Pour note, nous identifions **l'embarquabilité** comme étant définie par le **déterminisme**, la **robustesse**, et les **ressources de calcul et de stockage** nécessaires à l'intégration de la méthode à mettre en œuvre.

Tableau II-4. Tableau de critères d'évaluation de fonction de diagnostic

Critères	Définition
Rapidité de détection et/ou d'identification	Quel temps de réponse est attendu ?
Aptitude d'isolation du (des) défaut(s)	La méthode est-elle apte à isoler les défauts ?
Robustesse	Comportement de la méthode face aux bruits et à la dégradation du système surveillé ? (pas d'écroulement soudain des performances)
Identification de nouveautés	La méthode doit-elle pouvoir détecter les défauts ?
Niveau de prérequis pour la modélisation	Quel est le niveau de connaissance requis pour implémenter la méthode ?
Identification de défauts multiples	La méthode doit-elle être apte à détecter plusieurs défauts à la fois ?
Facilité d'explication	La méthode permet-elle d'expliquer facilement l'origine et le mode de propagation des défauts ?
Capacité de calcul requise	Combien de ressources de calcul la méthode nécessite-t-elle ?
Capacité de stockage requise	Combien de ressources de stockage la méthode nécessite-t-elle ?

Adaptabilité	La méthode doit s'adapter aux changements de l'environnement ou de la composition de l'entité à surveiller.
Evaluation non destructive	La méthode nécessite-t-elle des données d'entrées précises exploitables par la suite ?
Généricité	La méthode est-elle applicable à d'autres systèmes équivalents ?
Intrusivité	La méthode est-elle intrusive sur le fonctionnement du système à surveiller ?
Disponibilité	A quelle cadence la méthode peut-elle fournir des résultats ?
Taux de couverture des défauts	Quel est le taux de couverture requis pour l'entité à surveiller ?
Redondance possible	Peut-on mettre en œuvre une autre méthode pouvant fournir des résultats similaires ?

F.4. Quantification des critères d'évaluation

L'étape de quantification intervient après l'identification des critères et la caractérisation de la chaîne. Cette étape permet de trier par ordre d'importance les critères identifiés et de cadrer la valeur correspondante. Par exemple, l'intrusivité d'une méthode d'identification de défaut peut être primordiale au sens où elle doit être la plus faible possible.

L'ensemble de ces critères permet également d'évaluer les compromis de conception et de caractéristiques de la méthode d'identification et de diagnostic à implémenter. Nous y retrouvons notamment :

- la rapidité de détection par rapport au le taux de fausses alarmes ;
- la complexité du modèle intégré par rapport à l'efficacité de détection et d'identification ;
- la puissance de calcul par rapport à la capacité de stockage.

F.5. Synthèse des résultats obtenus

La synthèse propose une ou plusieurs méthodes d'identification et de diagnostic de défaut à partir des critères d'évaluation sélectionnés et de leur tendance. Cette phase effectue deux tris sur l'ensemble des méthodes de FDI/FDD telles que présentées dans le chapitre 1. Ces deux phases prennent en compte les exigences du CdCF du cas d'application et retranscrivent leur impact sur les critères d'évaluation. La première phase consiste à éliminer les méthodes, voire les types de méthodes, qui ne correspondent pas aux critères. La seconde phase identifie les méthodes les plus optimales pour le cas d'application dans la liste restante.

F.6. Mise en application du processus

F.6.1. Caractérisation de la Chaîne d'Acquisition Capteur

La Chaîne d'Acquisition Capteur que nous souhaitons intégrer se base sur la CAC de test précédemment étudiée (II.2 Défauts ciblés), cependant l'étage d'adaptation a été modifié. Nous avons remplacé le pont différentiel classique par un pont de Wheatstone, afin d'agrandir la plage de numérisation du Convertisseur Analogique/Numérique. Ainsi l'équation ci-dessous représente le comportement du pont de Wheatstone utilisé comme conditionneur de signal, et illustré en Figure II-21.

$$(V_p - V_{ref}) = V_{a\lim} \times \frac{R_{(T)} \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R_{(T)} + R_1) \times (R_3 + R_4)} \quad \text{II-10}$$

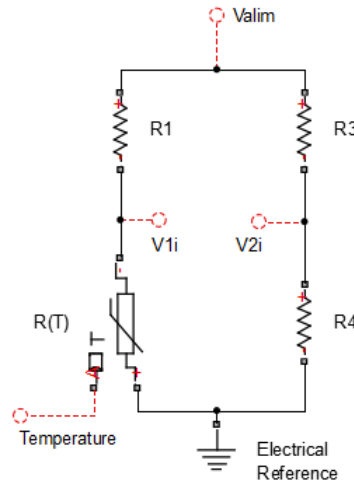


Figure II-21. Pont de Wheatstone implémenté

L'équation II-11, correspond au modèle mathématique de la CAC et nous sert de base pour sa caractérisation, sa modélisation, et sa simulation.

$$\begin{aligned} digit_{out(T)} = & (V_{a\lim} \times \frac{R_{(T)} \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R_{(T)} + R_1) \times (R_3 + R_4)} + V_{off_OA}) \\ & \times (1 + \frac{R_{OA1}}{R_{OA2}} \times \Delta) + V_{off_adc} \times G_{adc} \div q_{adc} \end{aligned} \quad \text{II-11}$$

La conception, simulation, et l'implémentation de la Chaîne d'Acquisition Capteur dans son ensemble sont présentées dans le chapitre 3.

F.6.2. Identification des critères d'évaluation des méthodes de détection et de diagnostic

Ci-dessous nous listons les différents critères d'évaluation qui interviennent dans la sélection de la méthode d'identification des défauts :

- Embarquabilité

Dans notre cas d'étude, l'embarquabilité concerne la ***puissance de calcul***, les ***ressources de stockage***, le ***déterminisme*** et la ***robustesse*** de la fonction à intégrer. Le matériel utilisable dans les conditions prévues est robuste mais basique, par conséquent les ressources en calcul et en stockage sont limitées. Le déterminisme est l'une des caractéristiques incontournables pour la certification d'un algorithme. Enfin, l'algorithme à implémenter doit être robuste afin de prévenir « en douceur » la transition de l'état de fonctionnement dégradé à un état de panne permanent.

- Déterminisme

Le déterminisme est l'une des caractéristiques incontournables pour la certification d'un algorithme puisque cette caractéristique assure que le système ne se retrouve pas dans un état inconnu ni n'excède une durée connue d'exécution

- Intrusivité

L'intrusivité de l'algorithme sur le fonctionnement normal de la CAC est un point clé de la méthode à implémenter. En effet, le niveau de disponibilité de la CAC dépendra du degré d'intrusivité de la fonction d'identification. Par conséquent, cette fonction doit occuper le moins possible la chaîne de traitement lors de ses phases d'identification des défauts.

- Prérequis pour la modélisation

Les prérequis pour la modélisation sont une caractéristique de méthode d'identification à éviter, étant donné que nous ne possédons pas de jeu de données de tests permettant d'exploiter l'aptitude d'apprentissage de certains algorithmes.

- Généricité

La généricité de la fonction à déployer est un point important dans le sens où l'architecture que nous proposons se doit d'être réutilisable pour diverses mesures, voire d'autres applications plus intégrées ou dont le comportement de la CAC classique évolue de manière non linéaire.

- Taux de couverture des défauts

L'amélioration du taux de couverture de pannes fait partie des apports de notre architecture, la fonction d'identification de défaut doit pouvoir couvrir l'ensemble des défauts ciblés.

- Gestion des défauts multiples

La fonction à implémenter permet de surveiller un ensemble de défauts spécifiques, par conséquent elle doit être apte à en détecter plusieurs en même temps.

- Rapidité et disponibilité

La rapidité et la disponibilité de la mesure est l'une des exigences incontournables pour la CAC, a contrario de la fonction d'identification des défauts (du type dérives) qui ne nécessite pas une rapidité aussi contrainte. De plus ces dérives paramétriques peuvent être détectées avant qu'elles franchissent un seuil de criticité puisque ce sont des variations lentes (inertie de la température de l'environnement de la CAC et le vieillissement se quantifie en nombre d'heures d'utilisation).

- Facilité d'explication

La facilité d'explication des défauts désigne l'aptitude de l'algorithme à expliquer l'origine et le mode de propagation du défaut identifié au sein du système surveillé.

F.6.3. Quantification des critères d'évaluation

La Figure II-22 synthétise l'importance des critères d'évaluation par rapport à notre cas d'application. Les critères les plus importants sont l'identification et l'isolation de défauts multiples puisque l'on souhaite surveiller spécifiquement l'évolution des gains et offset de la CAC, et la robustesse de la méthode à implémenter, afin que les perturbations et bruits dus au fonctionnement de la CAC dans un environnement sévère n'altère pas ses performances. Comme nous ne possédons pas de jeux de données sur le comportement attendu de la CAC lors de l'apparition de défaut, ni de retours d'expérience sur le comportement des défauts dans le temps, la méthode à implémenter ne pourra pas se faire par apprentissage.

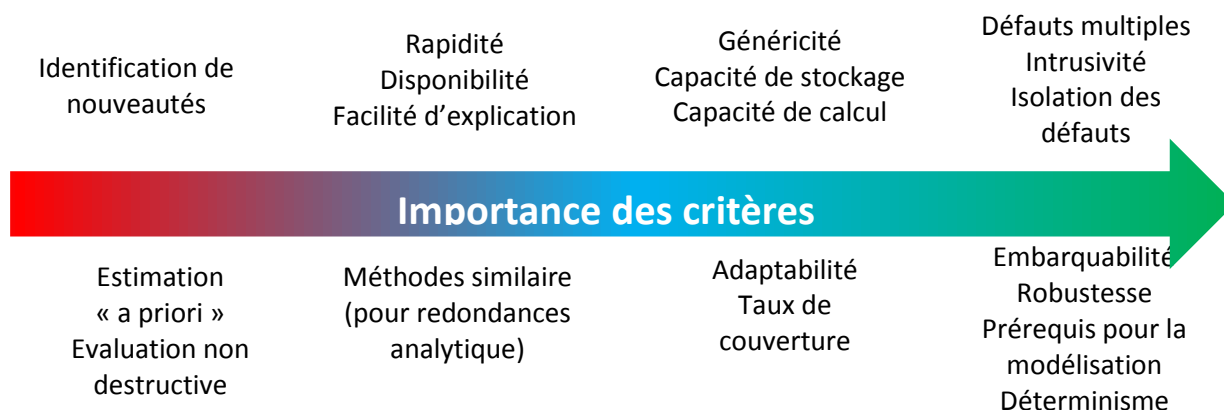


Figure II-22. Importance des critères du cas d'application

F.6.4. Synthèse des résultats obtenus

Au regard des critères d'évaluation, des compromis à prendre en compte, ainsi que de la classification des méthodes de FDI présentée dans le chapitre 1, nous pouvons éliminer les méthodes orientées sur l'estimation de signal et sur l'estimation d'état pour les raisons suivantes : l'estimation de signal nécessite une grande capacité de calcul pour l'identification et l'isolation de défauts multiples, elle est donc peu adaptée. L'estimation d'état nécessite également une grande capacité de calcul, un certain niveau de connaissance du système à surveiller, cependant elle est également très intrusive puisqu'elle nécessite un accès pratiquement constant aux données mesurées. Par la suite, nous devons également éliminer les méthodes classifiées en tant que « systèmes experts » puisque nous ne connaissons pas

suffisamment le comportement des défauts. Enfin, l'ensemble des méthodes majoritairement orientées sur l'apprentissage sera limité par l'absence de données de tests pour s'adapter (cas des réseaux de neurones).

Nous nous orientons donc vers l'utilisation d'un modèle qualitatif, basé sur la représentation mathématique physique de notre CAC. La méthode à mettre en œuvre doit donc fonctionner avec peu de ressources (stockage et calcul), s'adapter rapidement aux évolutions des paramètres surveillés, et assurer le suivi d'un système non-linéaire (en prévision de son utilisation pour des systèmes plus complexes). Par conséquent ce sont les *algorithmes génétiques bornés* qui répondent au mieux à notre besoin. Nous détaillons cette méthode et la manière de l'implémenter sur notre cas d'application dans le chapitre 3.

VII. Synthèse

Tout au long de ce chapitre nous avons présenté notre manière de concevoir une chaîne d'acquisition capteur plus robuste aux défauts. Notre cas d'application étant issu d'un projet industriel de recherche visant à la rupture technologique de systèmes aéronautique critiques, cela nous a permis de porter notre démonstration sur un exemple basé sur des exigences concrètes. De plus, la solution proposée prend en compte les tendances techniques et technologiques telles que présentées dans le chapitre 1.

Cette nouvelle architecture plus robuste se base sur l'augmentation de sa tolérance aux défauts. Ainsi, notre étude s'est concentrée sur l'identification des défauts plutôt que de leurs causes qui s'avèrent être multiples, et pour certaines, telles que les perturbations électromagnétiques, hors de notre portée. Par conséquent, nous ciblons les défauts de fonctionnement de la CAC, et notamment les défauts graduels majeurs qui ne sont pas couverts par les moyens de détection actuellement existant dans ce type d'application. Les dernières étapes ont mis à jour un ensemble de critères d'évaluation au regard du CdCF et de l'analyse fonctionnelle afin de trier, puis sélectionner une méthode d'identification des défauts.

En conclusion, l'architecture et les modes de fonctionnement proposés appréhendent le CdCF d'une Chaîne d'Acquisition Capteur critique, et intègre sa représentation mathématique comme modèle pour la détection, l'identification, puis la compensation des défauts surveillés. Cette solution prend en compte à la fois les contraintes aéronautiques et les perspectives de ce type d'architecture pour une implémentation au sein de systèmes plus complexes. Ainsi, notre CAC plus tolérante aux défauts est apte à garantir l'intégrité et la disponibilité de ses mesures, et pour une durée d'utilisation plus longue. Cette dernière est principalement due à l'identification plus fine des limites de fonctionnement, notamment par l'ajout d'une zone de fonctionnement dégradé à la place d'une frange de la zone de panne du système.

Chapitre III - Implémentation et réalisation

III.	Implémentation et réalisation.....	63
A.	Introduction.....	64
B.	Fonction de détection de défauts	64
B.1.	Principe mis en œuvre.....	64
B.2.	Moyen d'injection du signal de référence.....	66
B.3.	Moyen de détection de défauts	67
B.4.	Synthèse	69
C.	Fonction d'identification par les Algorithmes Génétiques.....	69
C.1.	Sélection des Algorithmes Génétiques.....	69
C.2.	Principes généraux des Algorithmes Génétiques.....	70
C.3.	Mise en œuvre.....	74
C.4.	Synthèse	78
D.	Mise en œuvre des Modes de Fonctionnement	78
D.1.	Gestionnaire des Modes de fonctionnement	79
D.2.	Mode acquisition.....	81
D.3.	Mode de détection de défauts.....	83
D.4.	Mode d'identification de défauts.....	85
D.5.	Optimisation de la détection de défauts.....	87
E.	Cas d'application	88
E.1.	Présentation de la Chaîne d'Acquisition Capteur mise en œuvre.....	88
E.2.	Modélisation de la fonction inverse.....	93
E.3.	Structure du banc de test.....	95
F.	Synthèse	96

A. Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons notre nouvelle architecture de chaîne d'acquisition capteur. En premier lieu, nous présentons le moyen de détection de défaut implémenté. En second lieu, nous effectuons un rappel sur les algorithmes génétiques que nous avons sélectionné précédemment comme méthode d'identification de défauts. Par la suite, nous détaillons les modes de fonctionnement ainsi que l'ordonnancement qui permet de respecter les contraintes définies dans le chapitre 2. Enfin, à partir de notre cas d'application, nous décrivons en détails la chaîne de conditionnement robuste élaborée ainsi que sa concrétisation par la réalisation d'un prototype et de son banc d'essai.

La Figure III-1 rappelle l'aspect fonctionnel de notre nouvelle architecture que nous avons détaillée dans le chapitre 2. Nous y retrouvons en orange, la partie matérielle de la chaîne d'acquisition capteur, et en bleu les fonctions embarquées dans un contrôleur.

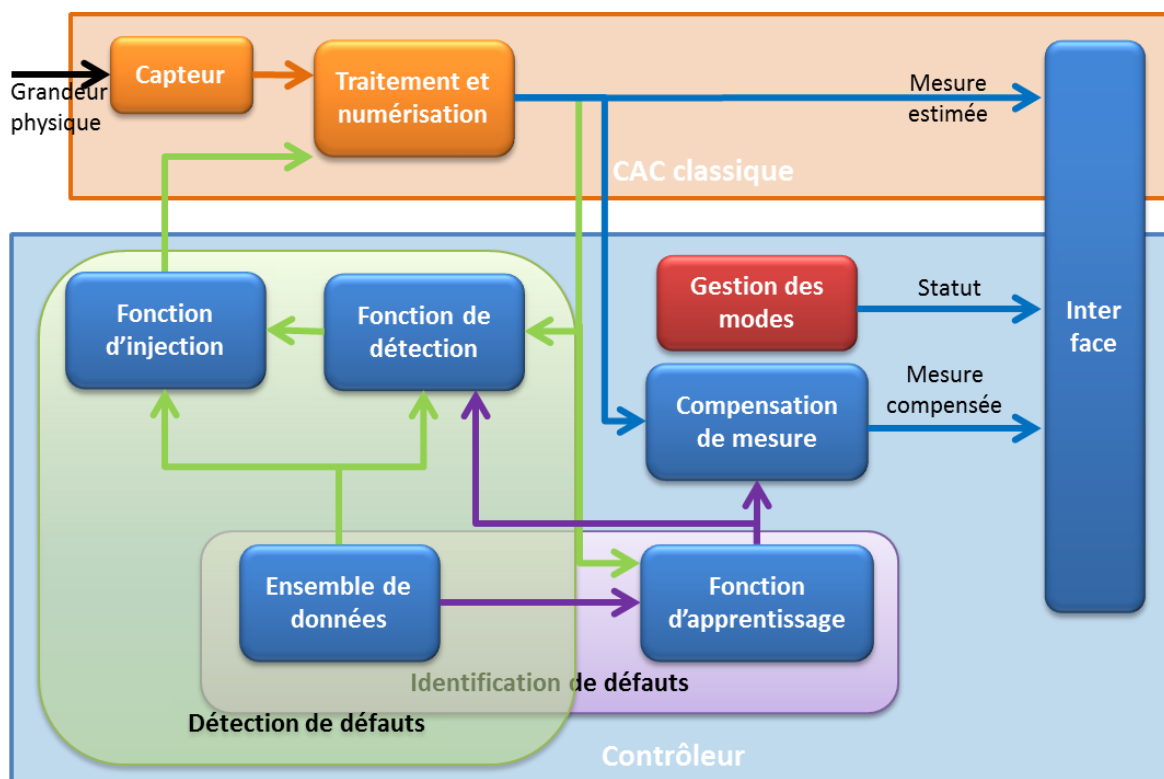


Figure III-1. Aperçu fonctionnel de l'architecture proposée

B. Fonction de détection de défauts

Ainsi que nous l'avons présenté dans le chapitre 2, la fonction de détection de défaut se compose de deux éléments essentiels qui sont le moyen physique d'injection du signal maîtrisé, et l'implémentation du moyen de détection de défaut. Ici, nous nous concentrons sur cette deuxième partie, la première étant détaillée dans le chapitre 2 où nous avons synthétisé les avantages et inconvénients de chacun des moyens matériels exploitables.

B.1. Principe mis en œuvre

Le moyen de détection de défaut que nous avons mis en œuvre se base sur l'évaluation de la génération de résidus entre la valeur attendue et la valeur mesurée d'une donnée injectée en

entrée de la CAC (pas du capteur). Ainsi que l'illustre la Figure III-2, le principe est d'injecter une valeur connue et maîtrisée se situant dans la plage de fonctionnement normale de la CAC, puis de comparer la valeur obtenue avec la valeur attendue. Cette dernière étant calculée à partir du modèle mathématique de la CAC, intégrant les derniers paramètres recalculés par la *fonction d'identification de défauts* s'il y en a.

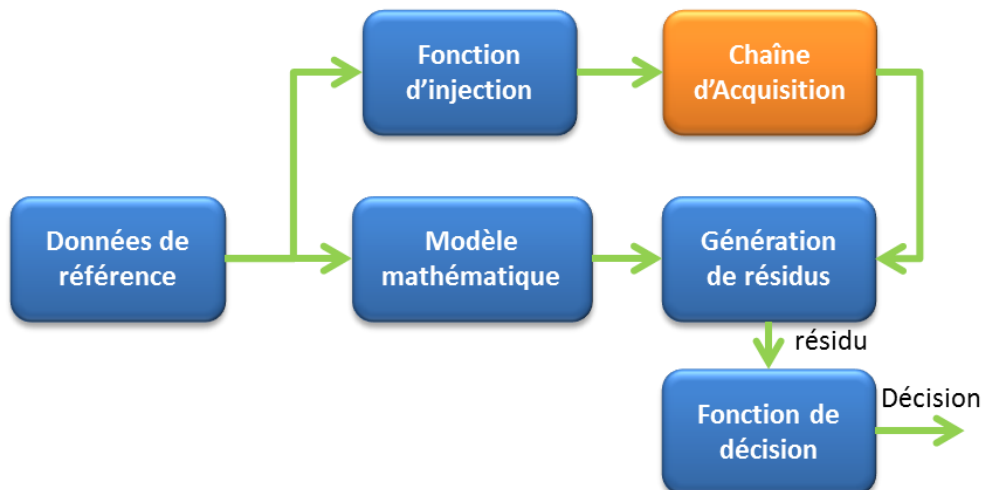


Figure III-2. Principe initial de la détection de défaut

Le bloc de détection de défauts se compose d'un jeu de données de référence, d'une *fonction d'injection* de ces données de test, et d'une *fonction de détection de défauts*. Cette fonction de détection de défaut intègre à la fois la *génération de résidus* entre les données reçues après injection et les données attendues, et un *bloc de décision* qui permet de valider ou non l'apparition d'un défaut.

Le bloc de données de référence contient le jeu de données de test à injecter en entrée de la CAC, la valeur de ces données étant systématiquement incluse dans l'échelle de valeurs normales en sortie du capteur. Il existe deux moyens de générer ces données de test, soit en enregistrant des valeurs fixes lors de la phase de calibration de l'ensemble de la CAC avant son installation, soit en enregistrant de manière pseudo-aléatoire certaines valeurs déjà estimées par la CAC et d'y appliquer le modèle mathématique inverse. Les valeurs des données de test se situent obligatoirement dans la plage de fonctionnement normale au point d'entrée de la CAC, sinon les tests de détection de défaut ne seraient pas viables.

Nous avons identifié deux types de données à injecter, chacun avec ses avantages et ses inconvénients. La première solution utilise un ensemble de données de valeurs de test, où les données sont enregistrées « en dur » dans la mémoire du contrôleur. La seconde solution utilise l'une des dernières données mesurées, lors de la phase d'acquisition de la grandeur physique. Cette seconde solution a la particularité d'exploiter une donnée partiellement indépendante de l'opérateur et des concepteurs. Le Tableau III-1 synthétise les avantages et inconvénients des deux solutions proposées.

Tableau III-1. Comparatif des données à injecter

	Ensemble de données	Mesure récente
Avantages	Données injectées totalement maîtrisées	Test sur la zone récente de mesure, donc détection plus performante
	Faibles ressources mémoire nécessaires	Très faibles ressources mémoire
Inconvénients	Bonne connaissance de la plage des données à injecter	Processus de détection de défaut plus complexe
	Risques de test de cas idéaux	Faibles ressources de calcul (vérification que la donnée à injecter se situe dans la plage de donnée normale)

Pour notre cas d'application, nous avons sélectionné l'ensemble de données comme moyen de stockage des données de référence à injecter, pour les raisons suivantes :

- Simplification d'implémentation
- Faibles ressources de calcul
- Robustesse du moyen face aux perturbations

B.2. Moyen d'injection du signal de référence

Dans le chapitre 2 nous avons présenté différents moyens d'injection de signal de référence : dans notre cas d'application nous implémentons un commutateur commandé numériquement par le lancement du *Mode de Détection de Défaut*. Ainsi que l'illustre la Figure III-3, le commutateur commandable numériquement intègre un certain nombre de redondance dans le but d'assurer son bon fonctionnement malgré l'apparition de ruptures physiques dans le composant.

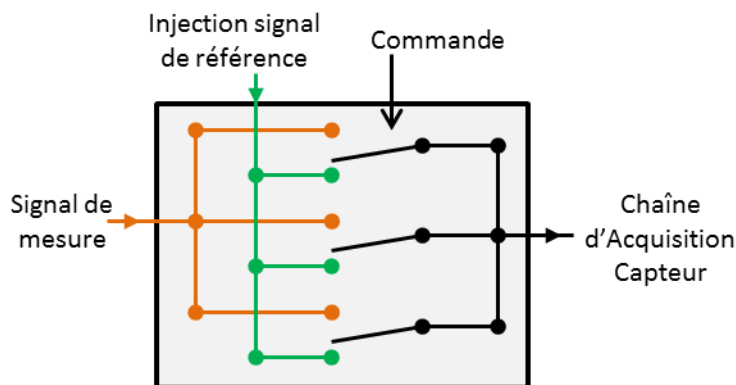


Figure III-3. Schéma de commutateur commandable

Ce moyen d'injection à l'avantage d'être simple et robuste, ce qui permet ainsi une reconfiguration matérielle rapide et stable (13 ns maximum pour le basculement d'état ouvert/fermé dans le cas d'un TS5A3166, [TI 05]). Cependant, l'introduction d'un moyen de reconfiguration dynamique introduit *de facto* une diminution de la sûreté de fonctionnement de la CAC. Cette étude sera à mener en phase de pré-industrialisation de la solution.

B.3. Moyen de détection de défauts

B.3.1. Modèle mathématique de la CAC

L'utilisation du modèle mathématique de la CAC est absolument nécessaire quel que soit l'origine des données à injecter, tel que le présente le Tableau III-1. Dans le cas de l'ensemble de données préenregistrées, le modèle mathématique est utilisé pour générer des données de *sortie calculées* pour la génération des résidus. Dans le cas de la mesure récente, le modèle mathématique est mis en place sous la forme inverse de la fonction de la CAC. C'est-à-dire qu'il est utilisé pour générer la donnée d'entrée de la CAC à partir des données estimée de cette dernière. Dans les deux cas, le modèle mathématique intègre les derniers paramètres recalculés avec succès par la fonction d'apprentissage du mode d'identification de défauts. La mise à jour des paramètres est nécessaire pour pouvoir détecter de nouveaux défauts uniquement.

B.3.2. Génération du résidu

La génération du résidu est le résultat de la différence entre deux signaux de nature identique. Dans notre cas, les signaux à comparer sont la sortie de test de la CAC avec la sortie calculée par la fonction mathématique qui représente la CAC, ainsi que le présente la Figure III-4. Cette fonction de génération du résidu est active dès lors que la donnée de référence est injectée en entrée de la CAC. Ainsi le résidu obtenu est exploité dans l'étape suivante, qui est la fonction de décision.

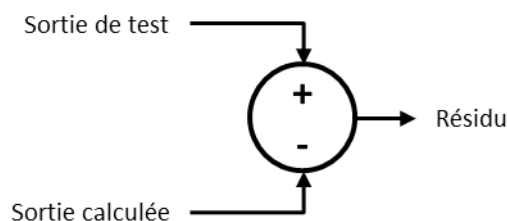


Figure III-4. Principe de la génération de résidus

B.3.3. Fonction de décision

La fonction de décision menant à la détection (ou non) d'au moins un défaut dans la Chaîne d'Acquisition Capteur, se base sur les performances attendues de l'entité. C'est-à-dire que la valeur du résidu ne doit pas excéder son équivalence en termes d'écart toléré, ce principe est illustré par la Figure III-5. L'écart toléré est dépendant des performances de précision que la CAC peut atteindre, il définit le type de seuil de décision à implémenter.

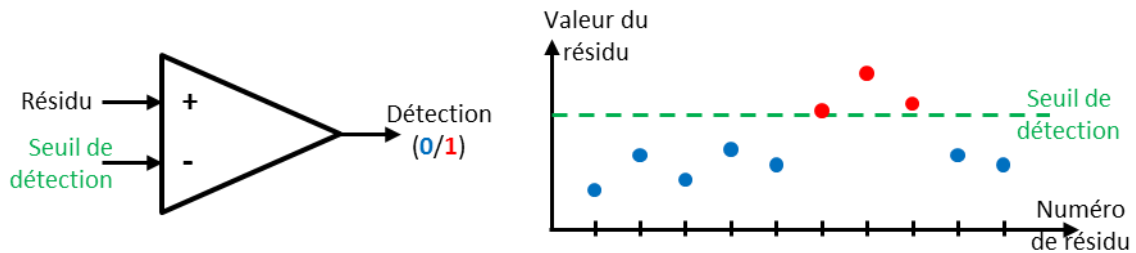


Figure III-5. Principe de la fonction de décision

De ce fait, nous avons identifié deux moyens pour la génération du seuil de détection : l'utilisation d'un seuil adaptatif, ou bien l'utilisation d'un seuil fixe. Le seuil adaptatif permet une détection plus efficace par la prise en compte de la grandeur d'influence la plus impactante sur le système à surveiller. Par exemple, dans le cas de la température comme grandeur d'influence majeure, cette technique est exploitable en utilisant les mesures issues des capteurs adéquats déjà existants et situés proches de la CAC. La proximité, ainsi que la dynamique de la température autour de la CAC sont déterminants quant à l'exactitude de la mesure réalisée, et donc l'efficacité du seuil adaptatif. L'utilisation d'un seuil fixe est plus simple à mettre en œuvre, cependant la valeur du seuil doit se baser sur la plus faible précision de la CAC sur l'ensemble de sa plage de fonctionnement dans le cas d'une fonction non linéaire.

Les deux moyens ont pour point commun l'importance de la calibration du seuil. En effet, le calcul de celui-ci se base sur le compromis entre la **rapidité de détection** nécessaire et le **taux de fausses alarmes** toléré. Enfin, ces deux moyens se distinguent par le compromis réglant l'efficacité de détection du seuil adaptatif par rapport à sa complexité. Ainsi, la Figure III-6 issue de nos travaux illustre la différence d'efficacité entre les deux moyens présentés.

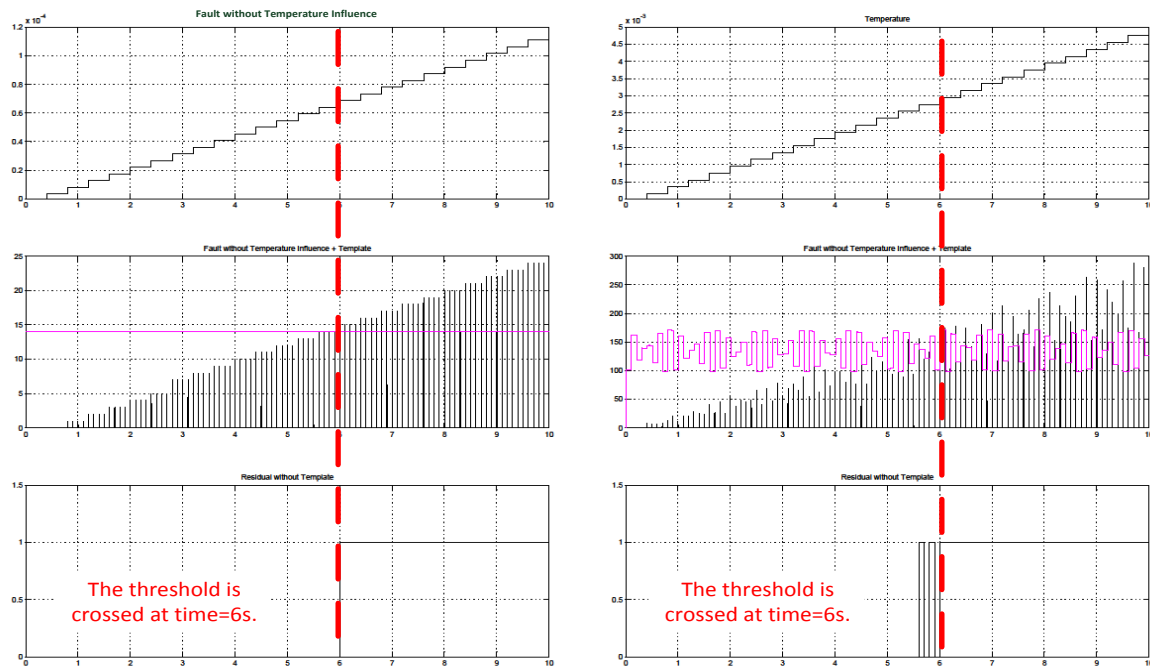


Figure III-6. Comparaison des seuils fixes (à gauche) et adaptatifs (à droite)

Les graphes de la Figure III-6 correspondent à la détection de défauts, pour une évolution de défaut continue sous forme de palier, pour différents types de seuils. Le graphe de gauche

correspond à la détection de défauts à partir d'un seuil fixe, tandis que le graphe de droite correspond à la détection de défauts à partir d'un seuil adaptatif. Le graphe en bas à gauche montre une détection effective à partir de 6s, tandis que le graphe de droite détecte le premier défaut dès 5.6s. Cette figure nous montre l'impact de la température sur l'efficacité de la détection de défauts. Dans le cas du seuil adaptatif, le défaut est détecté plus rapidement, puisque le seuil varie également en fonction de la température estimée. Notre article de conférence [MAR 13] donne plus de détails quant aux effets et aux apports des seuils adaptatifs.

B.4. Synthèse

La détection de défaut est donc une fonction activable de manière périodique, qui regroupe plusieurs fonctions telles que le moyen d'injection, la fonction inverse du modèle mathématique, la génération de résidu, et la fonction de décision. Le mode présenté ci-dessus met en lumière plusieurs compromis tels que la **rapidité de détection** en fonction du **taux de fausses alarmes**, la **complexité de la fonction de décision** VS en fonction de son **efficacité**. Nous y retrouvons notamment l'influence non négligeable de la température sur le fonctionnement normal de la CAC et de la fonction de décision [MAR 13].

C. Fonction d'identification par les Algorithmes Génétiques

C.1. Sélection des Algorithmes Génétiques

Nous avons sélectionné les Algorithmes Génétiques comme méthode d'identification des défauts, à partir du processus que nous avons élaboré et présenté dans le chapitre 2.

Pour rappel, les critères de sélection principaux de l'algorithme à déployer étaient son **déterminisme**, sa faible **intrusivité** sur la CAC, le faible **niveau de connaissances** nécessaire (des composants de la CAC et des défauts), son **embarquabilité**, et la faculté **d'isolation des défauts**.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté plusieurs classifications des méthodes d'identification et de diagnostic des défauts, celles-ci étant mises en œuvre dans divers domaines d'application (automatique, chimie, traitement du signal). De ces classifications, nous avons identifié trois classes majeures qui sont **l'estimation d'état**, **l'estimation de signal**, et **l'estimation de paramètres**. L'estimation de paramètres est la classe la plus optimale vis-à-vis de notre cas d'application puisque ses méthodes d'identification de défauts ne nécessitent ni un rebouclage continu (a contrario de l'estimation d'état), ni de capacités de calcul extrêmement élevées (a contrario de l'estimation de signal). L'utilisation de « bornes » pour l'évolution des paramètres, ainsi que d'un nombre maximal d'itérations de recherche, rend la méthode plus déterministe.

Par la suite, l'utilisation d'un algorithme auto-adaptatif permet de satisfaire les exigences d'embarquabilité et de faible niveau de connaissance des défauts et des composants de la CAC.

Enfin, la méthode à mettre en œuvre se doit d'être la plus générique possible afin d'être exploitable sur diverses CAC, voire des systèmes plus complexes dans le cas de systèmes non-linéaires.

En suppléments des apports cités, les algorithmes génétiques bornés apportent la faculté de localisation des défauts et l'aptitude d'identifier plusieurs défauts en même temps.

C.2. Principes généraux des Algorithmes Génétiques

Les Algorithmes Génétiques sont des algorithmes d'optimisation qui se basent sur des techniques dérivées de la génétique et qui découlent de l'évolution naturelle : croisement, sélection, mutation, etc. [DAW 89]. Les algorithmes génétiques sont mis en œuvre dans de nombreux domaines [MIC 99], à travers diverses applications [CHA 01], et [RAN 04], telles que :

- l'optimisation,
- la programmation automatisée,
- l'apprentissage (*Machine Learning*),
- l'économie,
- les systèmes immunitaires artificiels,
- l'Ecologie,
- la génétique des populations,
- l'évolution et apprentissage,
- les systèmes sociaux.

Le principe de fonctionnement des algorithmes génétiques dans un processus de surveillance peut se retranscrire tel que le présente la Figure III-7, [CAO 99].

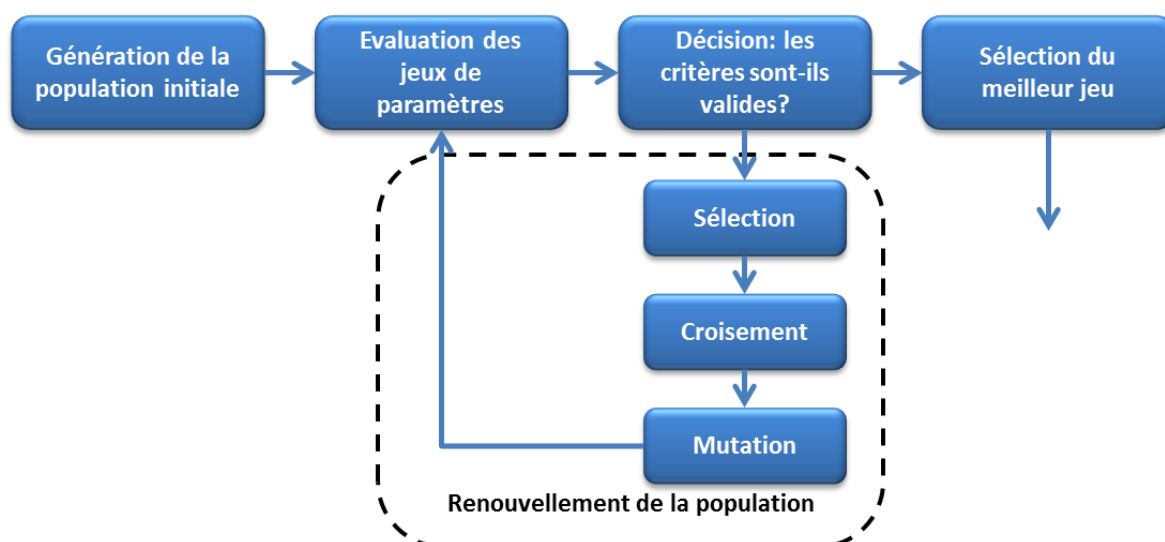


Figure III-7. Procédure standard d'algorithme génétique canonique [CAO 99]

Les principales étapes des algorithmes génétiques se localisent au sein de la génération de la population initiale, dont le volume de l'ensemble de données générées impacte sur la rapidité et l'efficacité du reste du processus. L'étape suivante est l'évaluation des couples générés, et

plus précisément la fonction de coût mise en œuvre. Enfin, l'étape de renouvellement de la population intervient pour faire évoluer l'ensemble de données à évaluer. Dans le cas idéal, le couple d'individu recherché est généré dans la première étape, ce qui dépend directement de la complexité de la fonction et du volume de la population générée. La Figure III-8 représente le cas classique : celui de la recherche par génération de nouvelle population. La courbe noire représente l'évolution tolérable des paramètres connus, et l'étoile verte correspond au couple d'individus idéal.

La **sélection** est un processus qui permet d'identifier et de conserver les individus dont les caractéristiques s'approchent le plus des caractéristiques recherchées. Le **croisement** correspond au mélange des caractéristiques de deux individus sélectionnés, afin d'obtenir un nouvel individu potentiellement plus proche de la solution recherchée. La **mutation** s'effectue sur une portion définie de la nouvelle population, et modifie certaines caractéristiques de manière pseudo-aléatoire.

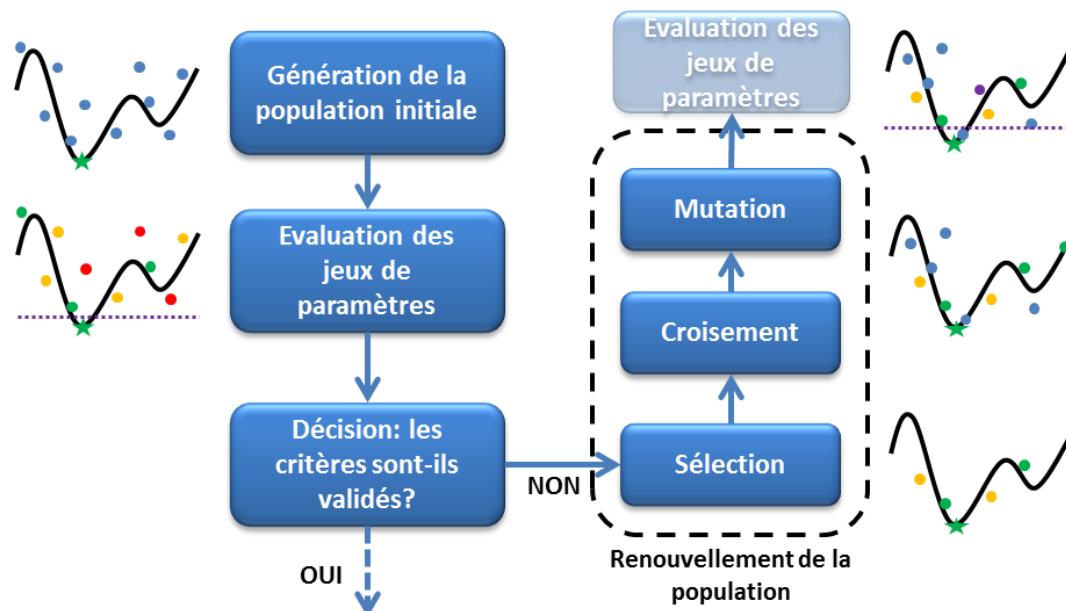


Figure III-8. Processus de génération de nouvelle population

Par exemple, dans le cas d'une fonction simple du type $y=ax+b$, où 'a' et 'b' sont les paramètres à surveiller, le processus standard de renouvellement de la population se déroulerait tel que le présentent les étapes 1 à 3. Dans cet exemple, la sélection est basée sur les 50% meilleurs couples par rapport au besoin, et un faible taux de mutation de 1 pour 'm' couples d'individus.

Etape 1 : Génération de la population

L'étape de génération de population permet d'établir un ensemble de données de paramètres à tester. Dans le cas d'une fonction $y=ax+b$, la génération de population conçoit un ensemble de donnée de dimension $[m, 2]$, 'm' étant le nombre de paramètres 'a' et 'b', ainsi que l'illustre la Figure III-9.

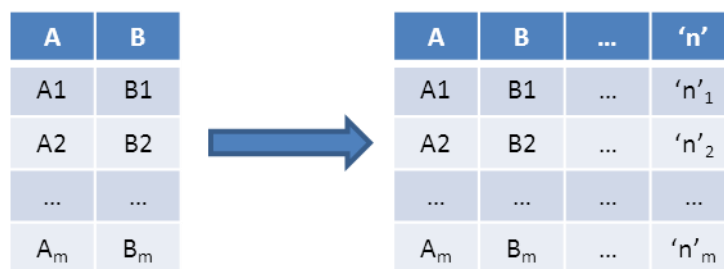


Figure III-9. Exemple de génération de population

Etape 2 : Evaluation des couples

Le **processus d'évaluation** des couples se décompose en deux phases qui sont l'**évaluation de résidus** et l'application d'une **fonction de coût** pour la recherche du couple optimal. Les résidus sont générés à partir de la différence des données de sortie de la chaîne réelle et du modèle mathématique simulé, tel que l'illustre la Figure III-10. La fonction de coût est une fonction de comparaison des résultats qui intègre des coefficients pour chaque donnée de test. Ces coefficients correspondent à l'importance des données de test entre elles. Pour faire le lien, trois données de test α , β , et δ située respectivement en bas, au milieu, et en haut de la plage de mesure n'auront pas la même importance si le régime normal du système amène à mesurer principalement une valeur proche de δ .

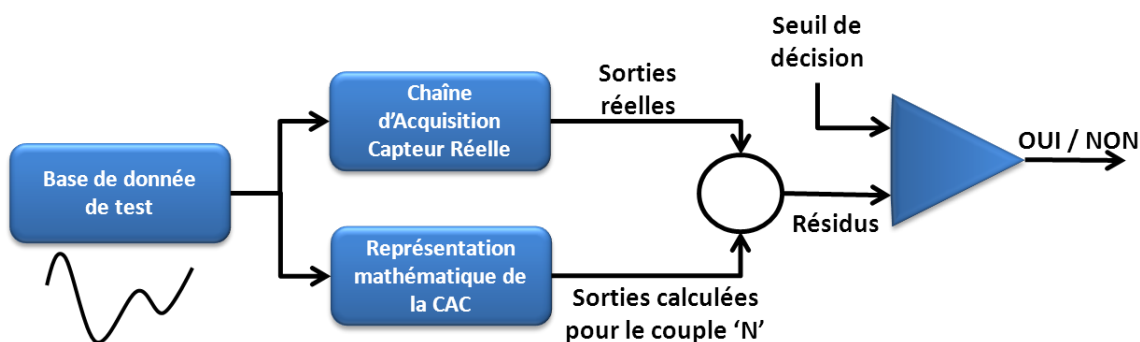


Figure III-10. Processus d'évaluation

Etape 3 : Renouvellement de la population

Lorsque la fonction de décision ne retourne aucune solution, il est nécessaire de renouveler la population et de recommencer l'étape d'évaluation. Le renouvellement de la population se compose de trois parties successives telles que la sélection, le croisement, et la mutation.

L'objectif de la **sélection** est de conserver les couples les plus proches de la solution recherchée, la règle de sélection ainsi que la méthode employée dépend des besoins et des contraintes de l'opérateur. Le Tableau III-2 résume les méthodes de sélection les plus couramment utilisées.

Tableau III-2. Méthodes de sélection

Méthode de sélection	Principes
Méthode de la Roulette	Utilisation d'une fonction de coût qui permet de déterminer la probabilité de chaque couple d'individu d'être sélectionné
Méthode du Tournoi	Sélection du meilleur couple d'individus dans chaque 'pool' jusqu'au finaliste
Sélection uniforme	Chaque couple d'individus à une probabilité de $1/N$, avec 'N' le nombre de couples, d'être sélectionné
Sélection par rang	Sélection des couples d'individus qui présente les meilleurs scores d'adaptation pour chaque individu proposé

Le **croisement** permet de renouveler la population afin d'atteindre le même nombre d'individus avant la sélection. Cette étape consiste au mélange des individus des différents couples sélectionnés entre eux, elle permet d'accroître la convergence des individus vers une solution fiable au regard de la fonction de coût précédemment énoncée.

La **mutation** permet de modifier certains individus nouvellement créés lors de la phase de croisement, c'est une fonctionnalité très importante dans le cas d'un système non linéaire. En effet, la mutation permet de remplacer un nombre défini (par l'utilisateur) de paramètres de certains individus afin de proposer des individus qui se démarquent de la tendance générale. Cela a pour avantage de pouvoir sortir la convergence du groupe d'individu d'un minimum local, vers un minimum global.

La Figure III-11 synthétise le fonctionnement de la génération de couples, ainsi que du renouvellement de population.

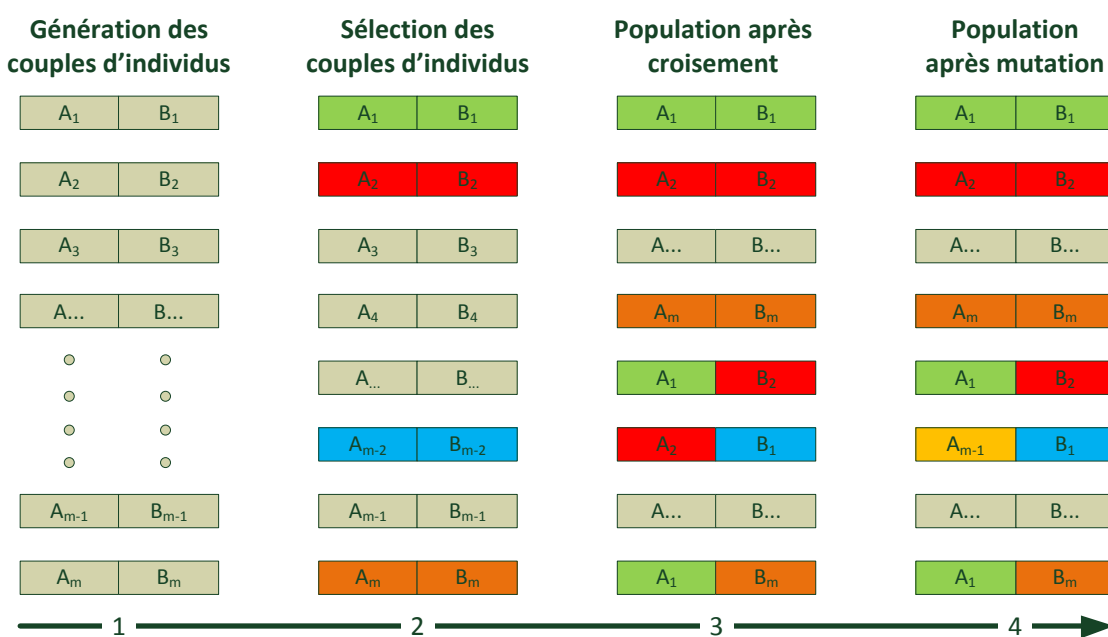


Figure III-11. Processus standard de génération de nouvelle population

Ainsi, à chaque renouvellement de la population (étape 2 à 4), l'ensemble des couples converge vers la solution optimale, bien que le taux de mutation permette de tester d'autres solutions éloignées de la tendance du groupe et ainsi éventuellement sortir de minima locaux.

C.3. Mise en œuvre

Chaque étape de la mise en œuvre de notre solution concerne les quatre paramètres que nous avons identifié dans le chapitre : offset d'amplification, gain d'amplification, offset de conversion, gain de conversion.

Nous avons implémenté les mêmes procédures de génération de population de test, paramétrage de croisement et de mutation, pour chaque paramètre surveillé, en y intégrant à chaque fois les bornes respectives identifiées dans les fiches techniques des composants ciblés. La fonction de coût prend en compte l'importance des quatre paramètres identifiés dans le chapitre 2 : gain et offset de l'étage d'amplification et de l'étage de conversion.

C.3.1. Processus de génération

Le processus de génération d'une nouvelle population est le premier élément clé qui permet de converger le plus rapidement possible vers une solution recherchée. Il génère un ensemble de données de taille conséquente, initialement définie par l'opérateur. La taille de l'ensemble de donnée se définit par rapport au compromis **efficacité d'identification** en fonction de la **rapidité d'identification**, au nombre de paramètres à rechercher, et à la précision demandée. Si le volume de donnée s'avère être trop limité, c'est l'efficacité (et donc la durée de calcul) qui devient problématique. Il faut également prendre en compte le fait que les plages de données classiques ne sont pas forcément bornées, ce qui entraîne la génération d'individus aux caractéristiques très disparates. Par conséquent, la taille de l'ensemble de données et la précision recherchée doivent être strictement encadrées pour éviter tout débordement qui risquerait de limiter la **certificabilité** de l'entité.

Ici, notre contribution pour la mise en place des algorithmes génétiques se détermine par l'optimisation de cet ensemble de données, à travers la mise en place de bornes pour la plage de valeur de chaque paramètre, ainsi que l'optimisation de la génération d'individus par rapport au besoin.

En premier lieu, afin de limiter la plage de variation des paramètres de test par l'algorithme génétique, chacun de ces paramètres est borné par des valeurs définies par les fondeurs des composants. Ces derniers assurent le bon fonctionnement du produit pour une utilisation donnée, dans un environnement de fonctionnement donné. Ils définissent également :

- la plage d'évolution des paramètres de leurs composants en fonction de la température ambiante (exprimé en ppm/°C),
- les valeurs minimales et maximales des paramètres au-delà desquelles les performances du composant s'avèrent dégradées, et dont les constructeurs des composants ne garantissent plus leur bon fonctionnement.

De ce fait, nous intégrons les limites min/max des composants définies par les constructeurs en tant que bornes de la plage de valeurs pour la génération des individus (i.e. couples de paramètres) de test par l'algorithme génétique. C'est-à-dire que les paramètres recalculés se

situent obligatoirement dans la plage de valeur où les constructeurs assurent le bon fonctionnement de leur produit.

En second lieu, nous savons que les dérives paramétriques ciblées (offset et gain des étages d'amplification et de numérisation) sont des évolutions graduelles et lentes. Par conséquent, nous pouvons estimer que les valeurs à rechercher demeurent relativement proches des valeurs précédentes (calculées ou initiales). De ce fait, au lieu d'une génération probabiliste aléatoire sur l'ensemble de la plage de donnée, il est intéressant d'augmenter la probabilité de générer des paramètres nouveaux autour des valeurs précédentes afin de converger plus rapidement vers une solution satisfaisante. Pour ce faire, nous utilisons une loi normale de distribution, rappelée en III-1, dont la valeur moyenne correspond à la valeur du paramètre précédemment connue, et dont l'écart-type, rappelé en III-2 se calcule par rapport à la distance minimale entre cette valeur moyenne et les limites. Par soucis d'optimisation de calcul, les valeurs générées qui dépassent les limites sont ramenée à la valeur de la limite à ne pas franchir.

Loi normale de distribution (gaussienne de probabilité):

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{III-1}$$

Ecart type pour une variable aléatoire X, où 'X' correspond à notre paramètre

$$\sigma_x = \sqrt{E[X^2] - E[X]^2} \quad \text{III-2}$$

Ainsi, la Figure III-12 illustre le modèle de génération de population initiale pour chacun des paramètres à surveiller. Dans notre cas, il y aura donc quatre modèles de génération de population basés sur une équation identique, mais spécifiquement calibrés selon les critères suivants : valeur initiale, valeur minimale, valeur maximale.

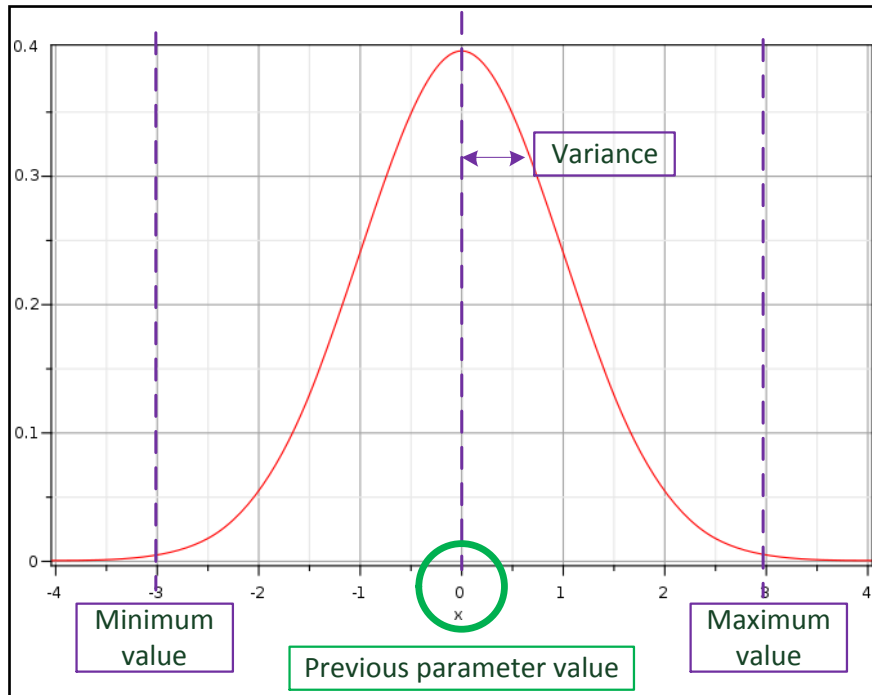


Figure III-12. Loi normale de distribution pour la génération de paramètres

Au sein de la Figure III-12, nous retrouvons les limites minimale et maximale en violet, ainsi que la valeur moyenne (valeur précédente du paramètre) en vert.

Par conséquent, cette fonctionnalité permet de faciliter le suivi de l'évolution de chacun des paramètres, et donc d'accélérer la recherche de solution. Cette solution n'impose pas de ressources de calcul trop importantes du fait que la représentation mathématique de la CAC et la loi de distribution normale demeurent relativement simples, ni de capacité de stockage importante puisque l'on est apte à limiter la taille de l'ensemble de données par l'intégration des bornes. Ces deux avantages permettent également de limiter le nombre d'itérations globales, telle que nous l'avons présenté précédemment à la Figure III-7.

C.3.2. Processus d'évaluation des couples d'individus

Le processus d'évaluation se réalise comme illustré Figure III-13, afin de trier les couples de paramètres pouvant être retenus ou non. L'ensemble de données contient les données à utiliser pour la phase de test, et celles-ci sont injectées dans la CAC réelle afin d'obtenir les sorties correspondantes pour chaque donnée de test. Ces données sont également utilisées pour chacun des couples de paramètres qui ont été précédemment générés.

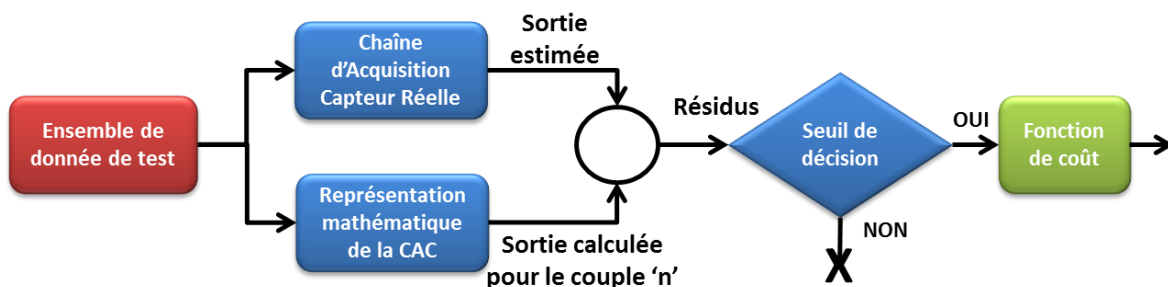


Figure III-13. Processus d'évaluation

La fonction de coût intègre également un processus d'identification du meilleur couple de paramètres lorsque des couples de paramètres ont été validés. Cela permet d'améliorer la précision de correction du nouveau paramètre, et par conséquent de diminuer la fréquence nécessaire de correction de l'ensemble. Cette fonction prend en compte l'importance de chacun des paramètres identifiés dans le chapitre 2. Par exemple, pour identifier lequel des trois couples illustrés en Figure III-14 est optimal, la fonction de coût d'une équation type $y=ax+b$ se présenterait sous la forme,

$$\text{Couple_idéal} = \text{minimum}(2a_i + b_i)$$

pour $i=1$ à n , n étant le nombre de couples

Où 'a' est le paramètre dont la valeur estimée doit être la plus proche possible de la valeur réelle, puisqu'il s'agit du gain, et 'b' le paramètre de moindre importance puisqu'il s'agit de l'offset.

Bien évidemment, le couple optimal sera celui dont la valeur ' y_n ' en fonction de ' x ' est la plus proche du ' y ' recherché sur la plage de fonctionnement souhaité.

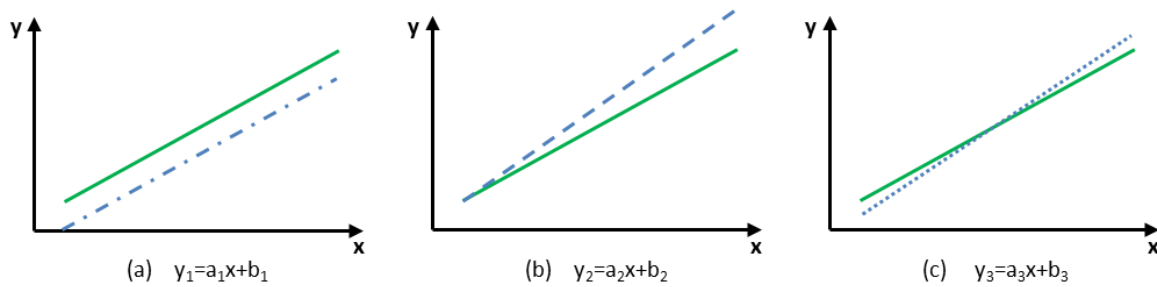


Figure III-14. Couples de test pour la fonction de coût

Afin de faire face aux besoins de disponibilité et aux contraintes d'intrusivité de notre rebouclage, il est intéressant de limiter le nombre de données de test à injecter au système réel. L'avantage de notre chaîne d'acquisition réside dans sa nature fortement linéaire, cela nous permet de limiter le nombre de points de tests tout en conservant un bon niveau de fiabilité et de précision. Dans notre cas d'application, nous avons identifié trois points de test : les deux extrema de la zone linéaire et le point d'utilisation actuel ou bien le point médian de la zone linéaire. Les deux extrema sont les points de test indispensables puisqu'ils permettent de retrouver l'allure globale de notre fonction de transfert. Le troisième point de test est à déterminer : soit il s'agit du point médian, ce qui permet d'affiner l'allure globale de la fonction de transfert ; soit il s'agit d'une donnée de test issue d'une mesure précédente, et dans ce cas la recherche de solution gagnera en précision par rapport à la plage de mesure actuellement estimée par la CAC dans son ensemble.

C.3.3. Processus d'identification de la précision de compensation

La précision de la compensation est le résultat du compromis entre le temps de réponse de l'algorithme pour l'identification des défauts (et donc de la valeur des paramètres réels), et l'efficacité de la compensation de ces nouveaux paramètres, qui augmentera la durée d'utilisation avant la prochaine détection de défaut. L'utilisation des algorithmes génétiques

bornés comme méthode d'identification nous permet de déterminer ce compromis de manière empirique.

C.3.4. Méthode de renouvellement de la population

Le renouvellement de la population se constitue de trois étapes successives, qui sont la sélection de couples, le croisement, et la mutation. Chacune de ces trois étapes appliquées à notre cas d'étude se différencie peu des principes généraux.

Dans notre cas d'application, nous utilisons la méthode de **sélection par rang** afin de conserver les 50% meilleurs couples de paramètres de la population générée. Cette méthode de sélection exploite les résultats de la fonction de coût précédemment présentée.

L'étape de **croisement**, vise à générer de nouveaux individus à hauteur des 50% d'individus non retenus lors de la phase précédente.

Enfin, la phase de **mutation**, n'est pas critique dans notre cas puisque le modèle mathématique est quasi-linéaire. Par conséquent, une valeur minimale de 1% de taux de mutation dans la nouvelle population générée est suffisante.

C.4. Synthèse

Le mode de détection de défaut se base principalement sur la fonction de décision et la méthode d'identification utilisées. En premier lieu, nous avons montré que les algorithmes génétiques bornés sont aptes à identifier et à localiser les défauts qui apparaissent. En second lieu, nous présentons la fonction de décision comme étant le point clé pour l'optimisation de l'identification des défauts. En effet, cette dernière permettra de cibler de manière précise les défauts à surveiller, et par conséquent l'intégrité des données de mesure. En troisième lieu, nous proposons une manière plus optimale pour la génération des populations de test, afin de respecter les contraintes imposées par le CdCF : déterminisme, rapidité de calcul, volume de stockage de données limité.

De plus, nous remarquons que la mise en œuvre d'un algorithme génétique borné comme moyen d'identification de défauts, nécessite d'assurer certaines restrictions à son utilisation, notamment la limitation du nombre de cycles de renouvellement de la population. En effet, dans le cas où l'un des paramètres dérive en dehors des tolérances l'algorithme ne parviendra pas à le calculer. De ce fait, le nombre de cycle de renouvellement de population doit impérativement être limité. Enfin, ces algorithmes génétiques peuvent être ré-exploité pour la surveillance de systèmes plus complexes, voire non linéaires.

D. Mise en œuvre des Modes de Fonctionnement

Cette partie décrit la mise en œuvre des modes de fonctionnement et des blocs fonctionnels associés. Premièrement, nous détaillons le bloc de gestion des modes et de l'interface de notre nouvelle architecture, deuxièmement l'ensemble des modes de fonctionnement implémentés au sein de notre solution sont explicités. Finalement, nous détaillons la fonction de compensation de défauts.

D.1. Gestionnaire des Modes de fonctionnement

La fonction de gestion des modes remplit deux objectifs qui sont la gestion de l'interface de la CAC et l'ordonnancement des modes de fonctionnement, présentés dans le chapitre 2. Au sein de l'interface, la fonction de gestion met à jour le statut de la CAC et des résultats des **modes de détection** et **d'identification** de défauts, et synchronise la valeur de la sortie compensée avec celle de la valeur de sortie estimée pendant le **mode d'acquisition**. L'ordonnancement des modes de fonctionnement se présente tel que l'illustre le diagramme de la Figure III-15.

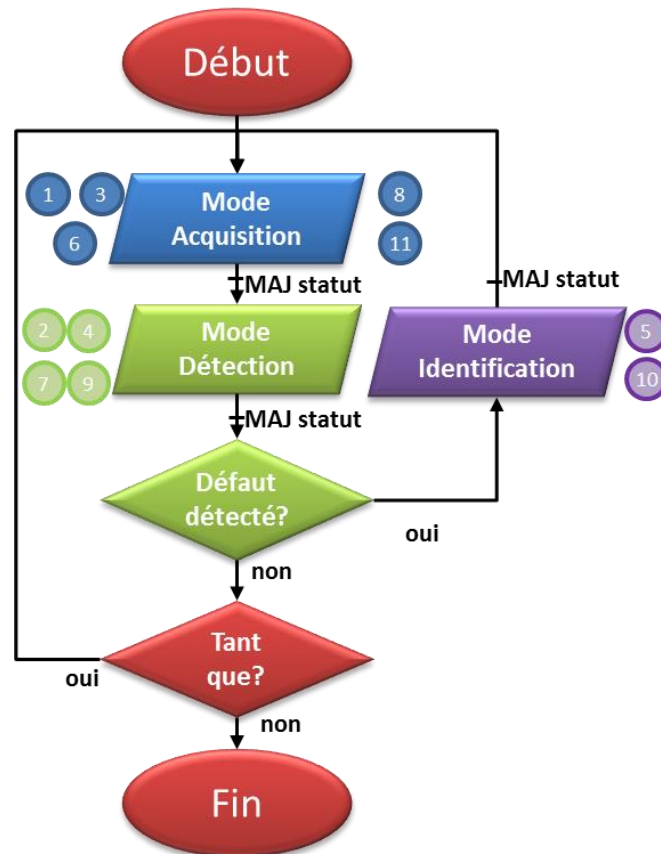


Figure III-15. Diagramme fonctionnel de la CAC proposée

Le **mode d'acquisition** est activé cycliquement de manière à délivrer une donnée de mesure fiable à la cadence imposée par le CdCF. Le **mode de détection de défauts** est activé cycliquement pour la surveillance des défauts graduels. Du fait de leur nature (dérives lentes), il est possible de réduire la cadence d'activation afin de diminuer l'intrusivité de la fonction d'injection de données de référence susceptible d'avoir une incidence sur la robustesse de ce mécanisme. Le **mode d'identification de défauts** est activé dès qu'un défaut est détecté par le mode précédent.

Par exemple, dans le cas de l'évolution lente d'un défaut au sein de la CAC, la Figure III-16 présente l'activation des modes de fonctionnement en conséquence. Afin de faciliter la compréhension de l'ordonnancement des modes de fonctionnement, nous avons numéroté chaque étape dans les Figure III-15 et Figure III-16, ainsi que le Tableau III-3.

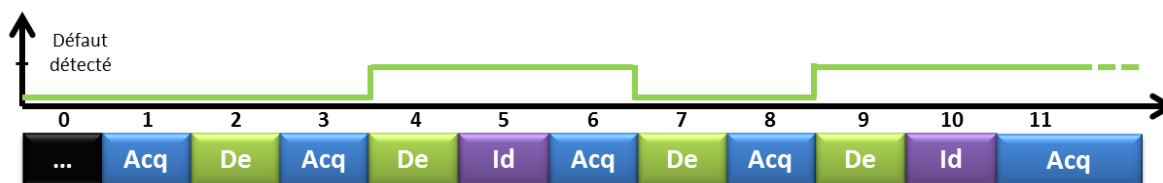


Figure III-16. Exemple de la gestion des modes de fonctionnement

Dans la Figure III-16, « *Acq* » correspond au **mode d'acquisition**, « *De* » correspond au **mode de détection** de défauts, et « *Id* » correspond au **mode d'identification** de défauts.

Le Tableau III-3 présente l'état des signaux de sortie de la CAC en fonction du mode de fonctionnement actif et de l'exemple illustré par la 16.

Tableau III-3. Synthèse de l'activation des signaux en fonction de l'état de la CAC

Mode activé	Signaux	Mode activé	Signaux
Acq ①	Mesure estimée Statut=OK	De ⑦	Statut=compensation
De ②	Statut=OK	Acq ⑧	Mesure estimée Mesure compensée Statut=compensation
Acq ③	Mesure estimée Statut=OK	De ⑨	Statut=défaut détecté
De ④	Statut=défaut détecté	Id ⑩	Statut=KO
Id ⑤	Statut=défaut(s) identifié	Acq ⑪	Mesure estimée Mesure compensée Statut=KO
Acq ⑥	Mesure estimée Mesure compensée Statut=compensation	...	

Nous pouvons rassembler les différentes étapes de la manière suivante :

- Lors des étapes 1 à 2, aucun défaut n'est détecté, de ce fait la CAC est considérée comme sûre et seule la mesure estimée est transmise.
- Lors des étapes 3 à 5, un défaut est détecté et identifié, par conséquent le statut de la CAC est mis à jour, et le mode d'acquisition active sa fonction de compensation afin de délivrer la donnée de sortie compensée.
- Lors des étapes 6 à 7, aucun nouveau défaut n'est apparu, la CAC conserve son statut et l'utilisation de la compensation.
- Lors des étapes 9 à 11, au moins un défaut est détecté mais il n'a pas pu être identifié. Par conséquent, la CAC s'identifie comme non sûre afin d'alerter l'unité connectée en aval. De plus, le mode d'acquisition continue de délivrer les mesures estimées et compensées, ces dernières étant compensées à partir des derniers paramètres recalculés avec succès.

Dans tous les cas, la CAC doit impérativement délivrer les informations de mesure afin de respecter son niveau de **disponibilité**. L'utilisation de la donnée transmise est déterminée par l'unité de calcul en aval.

D.2. Mode acquisition

Le **Mode Acquisition** présenté dans le chapitre 2 vise à assurer l'acquisition de la grandeur physique à mesurer dans le temps imparti selon le CdCF, ainsi qu'à fournir la mesure compensée si au moins un défaut a été détecté et identifié. Nous avons mis en œuvre une CAC classique ainsi que son modèle mathématique, intégrant les paramètres à surveiller.

D.2.1. Fonction d'acquisition

Pour ce qui est de l'utilisation des fonctions de mise en forme du signal, le processus se déroule tel que l'illustre le diagramme de gauche de la Figure III-17, c'est-à-dire que la valeur numérique en sortie du CAN (dernière étape de la CAC classique) est mise en forme de manière à la rendre exploitable par l'unité connectée en aval de notre CAC.

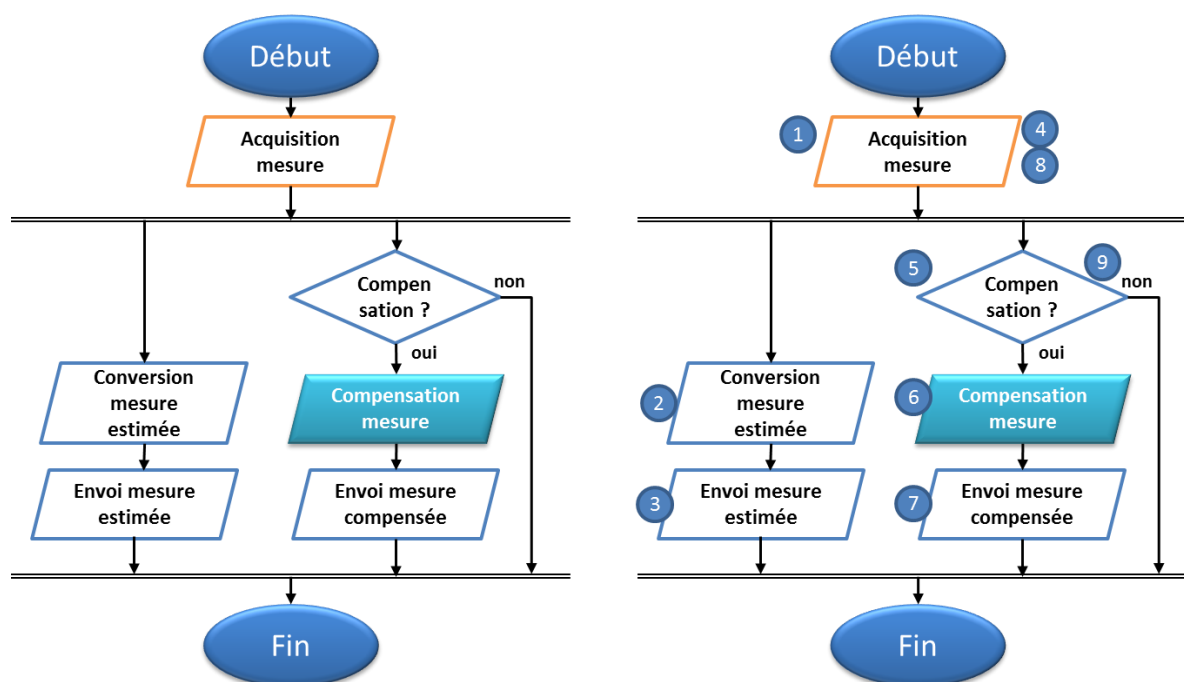


Figure III-17. Fonctionnement du mode d'Acquisition

Ainsi que le présente le diagramme de droite de la Figure III-17, trois cas de figure se présentent :

- Etapes 1 à 3 : le premier cas est idéal puisqu'aucun défaut n'est détecté (le statut de la CAC est considéré comme fiable : « OK »), le modèle mathématique inverse de la CAC intégrant les **paramètres initiaux** est alors appliqué pour la mise en forme du signal,
- Etapes 4 à 7 : Dans le second cas, au moins un défaut a été détecté et est compensé (le statut de la CAC est considéré comme « dégradé mais compensable »), le modèle mathématique inverse intégrant les **paramètres recalculés** est également utilisé pour recalculer la valeur de la grandeur physique mesurée. Dans ce cas de figure, les deux données, respectivement

mesure estimée et **mesure compensée** sont communiquées. Les paramètres recalculés sont communiqués par le **mode d'identification de défauts** à travers la fonction de gestion,

- Etapes 8 à 9 : Dans le troisième cas, un défaut détecté ne peut pas être compensé (soit au moins un des composants de la CAC a dérivé au-delà des spécifications constructeur, soit les algorithmes génétiques n'ont pas eu suffisamment de temps pour identifier le(s) nouveau(x) défaut(s)). La fonction de compensation est alors utilisée avec les derniers paramètres recalculés.

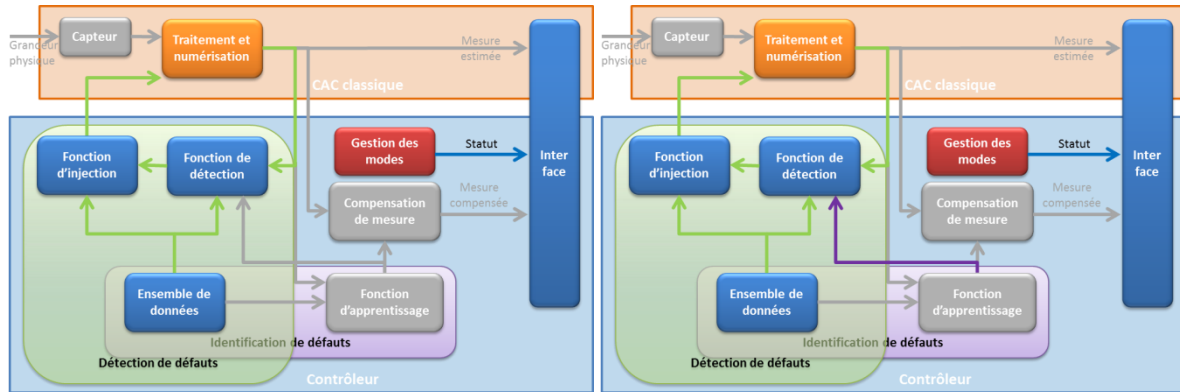


Figure III-18. Activation du mode d'acquisition avec et sans la compensation

Les schémas de la Figure III-18 sont issus du schéma global de l'architecture présenté en Figure II-9 et Figure III-1. Les deux schémas représentent les fonctions actives lors de l'utilisation du mode d'acquisition. Le schéma de gauche correspond au mode d'acquisition sans compensation de défauts, les sorties générées sont la *mesure estimée* et le *statut* de la CAC. Tandis que le schéma de droite correspond au mode d'acquisition avec compensation de défauts, les sorties générées sont la *mesure estimée*, la *mesure compensée*, et le *statut* de la CAC.

D.2.2. Fonction de compensation

La fonction de compensation est utilisée au sein du mode d'acquisition, elle prend en compte les défauts graduels détectés et recalcule ainsi la donnée de sortie afin que celle-ci soit au plus proche de la valeur réelle. Cette fonction est active lorsque de nouveaux paramètres ont été recalculés. Dans le cas d'un échec provenant du mode d'identification de défauts (CAC considérée comme non intègre) ce sont les derniers paramètres valides qui lui ont été transmis qui sont utilisés. Ainsi l'utilisateur final, étant averti du statut global de la CAC, peut décider de continuer à utiliser la donnée recalculée.

Le diagramme représenté par la Figure III-19 illustre les étapes de la compensation, celle-ci intègre la récupération des nouveaux paramètres ainsi que la donnée estimée (avant sa mise en forme via le modèle mathématique du capteur utilisé). L'étape de conversion de la mesure compensée exploite la fonction inverse du modèle mathématique de la CAC en intégrant les nouveaux paramètres.

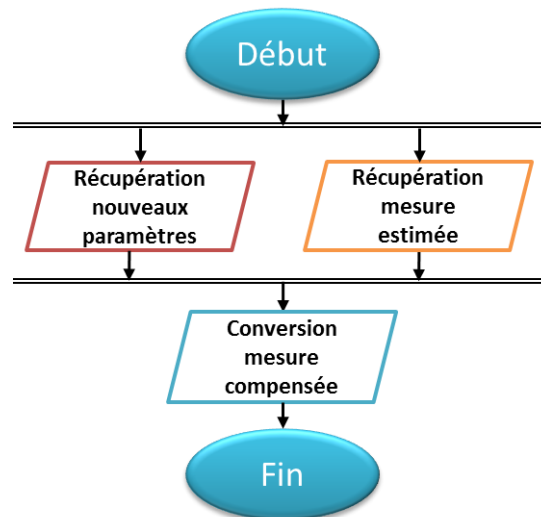


Figure III-19. Fonction de compensation

D.3. Mode de détection de défauts

Le mode de détection de défaut présenté dans le chapitre 2 a pour objectif la mise en évidence de l'apparition de défauts sur les paramètres surveillés. Le mode de détection de défaut mis en œuvre se base sur l'étude des résidus générés par la différence entre le modèle mathématique intégrant les derniers paramètres connus (initiaux, ou recalculés s'il y a déjà eu une compensation), et la CAC classique. Ce mode exploite les fonctions suivantes : un **moyen d'injection** de signal, un **ensemble de données**, le **modèle mathématique** de la CAC, la comparaison pour la **génération de résidu**, et une **fonction de décision**.

Dans le cas d'une sonde de température type RTD, le **moyen d'injection** permet de connecter la branche du pont de Wheatstone qui intègre la RTD à la CAC (Acquisition classique), ou de connecter le CNA qui convertit la donnée de référence à injecter (Détection de défauts). L'**ensemble de données** contient plusieurs valeurs situées dans la plage de tension équivalente en entrée de la branche positive de l'élément connecté en aval du pont de Wheatstone (ex : filtre différentiel). Le **modèle mathématique** de la CAC permet d'obtenir la valeur de référence attendue en sortie de la CAC, il prend en compte les paramètres initiaux, ou bien les paramètres dernièrement calculés par le mode d'identification des défauts dès lors qu'un défaut a été détecté et identifié. La **génération de résidu** vise à soustraire la valeur de référence attendue de la valeur de référence mesurée. La valeur du résidu met en évidence les différences entre la CAC réelle et son modèle mathématique équivalent, cependant il est sensible aux bruits présent dans la CAC. La **fonction de décision** permet d'identifier l'apparition d'un défaut à travers le bruit, grâce à un seuil prédéfini.

Ainsi que le présente la Figure III-20, le processus de détection de défauts exploite uniquement la valeur de sortie de la CAC classique, et aucune intrusion au sein de la CAC n'est réalisée. A l'issue de ce mode, la fonction de gestion va acquérir le statut de détection qui déterminera l'activation (ou non) du mode d'identification de défauts, les entrées et les sorties de référence correspondantes pour l'identification de ces défauts. Il y a une sortie de référence pour chaque entrée de référence injectée.

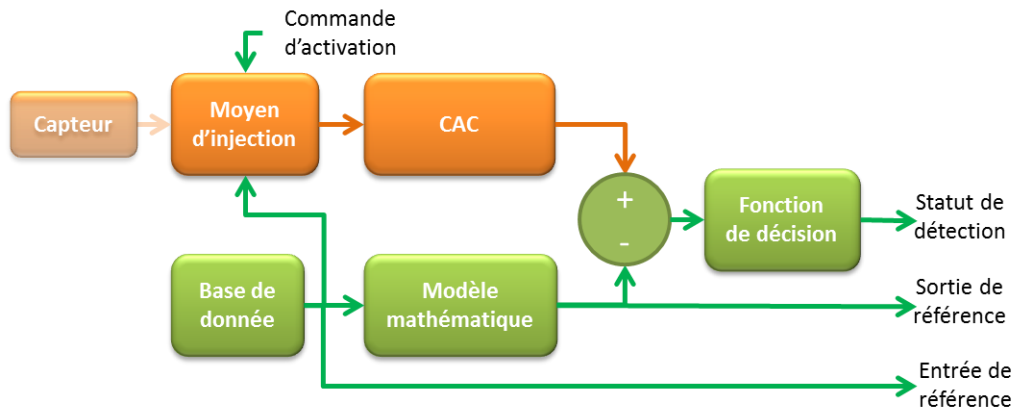


Figure III-20. Architecture du mode de détection de défauts

Ainsi, les schémas de la Figure III-21 mettent en avant les fonctions utilisées lors de l'activation du mode de détection de défauts.

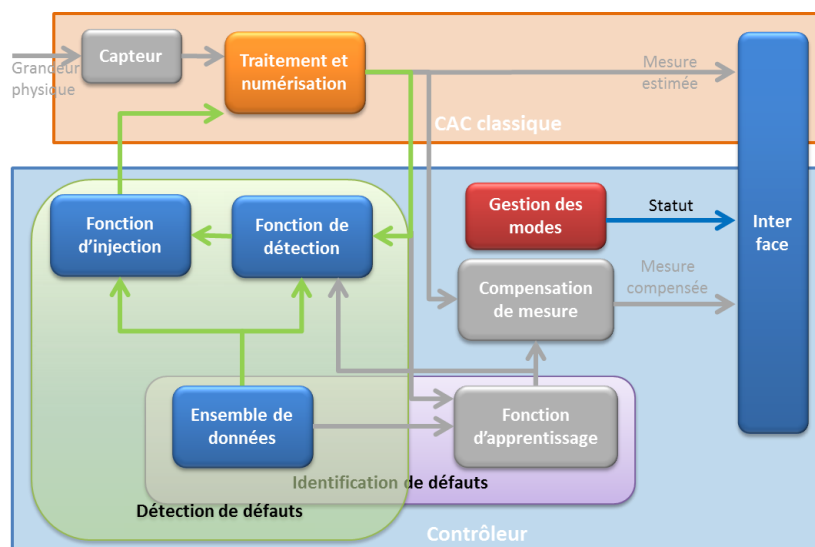


Figure III-21. Mode de détection de défauts

Le mode de détection de défaut suit une logique précise, telle qu'illustrée par la Figure III-22. Le mode se décompose en trois étapes majeures qui sont la **configuration matérielle**, la **détection de défaut**, puis la **reconfiguration matérielle et la communication des données de référence**. En premier lieu, l'étape de **configuration matérielle** permet de remplacer la branche du pont de Wheatstone qui intègre la RTD par la sortie du CNA pour l'injection de la donnée de référence au reste de la CAC.

En second lieu, la détection de défaut se compose de **l'injection d'une donnée de référence** puis de la récupération de la sortie via le **mode d'acquisition**, et du **calcul de la donnée de sortie** à partir du modèle mathématique intégrant les derniers paramètres recalculés (s'il y en a). Ces deux données de sortie (mesurée et calculée) servent à **générer le résidu** qui est comparé à un seuil prédéfini (voir *III.2 Mode de détection de défaut*) pour estimer si un défaut est apparu. La condition de rebouclage permet de réitérer ce processus en fonction du nombre de points de tests voulu.

Enfin, la reconfiguration matérielle (reconnexion du pont de Wheatstone) permet l'acquisition de la grandeur physique, et la communication des données de test à la fonction de détection :

données de référence en entrée, données de sortie mesurée, et données de sorties calculée. Cette reconfiguration matérielle mise en œuvre dans notre cas d'application est généralisable à d'autres CAC.

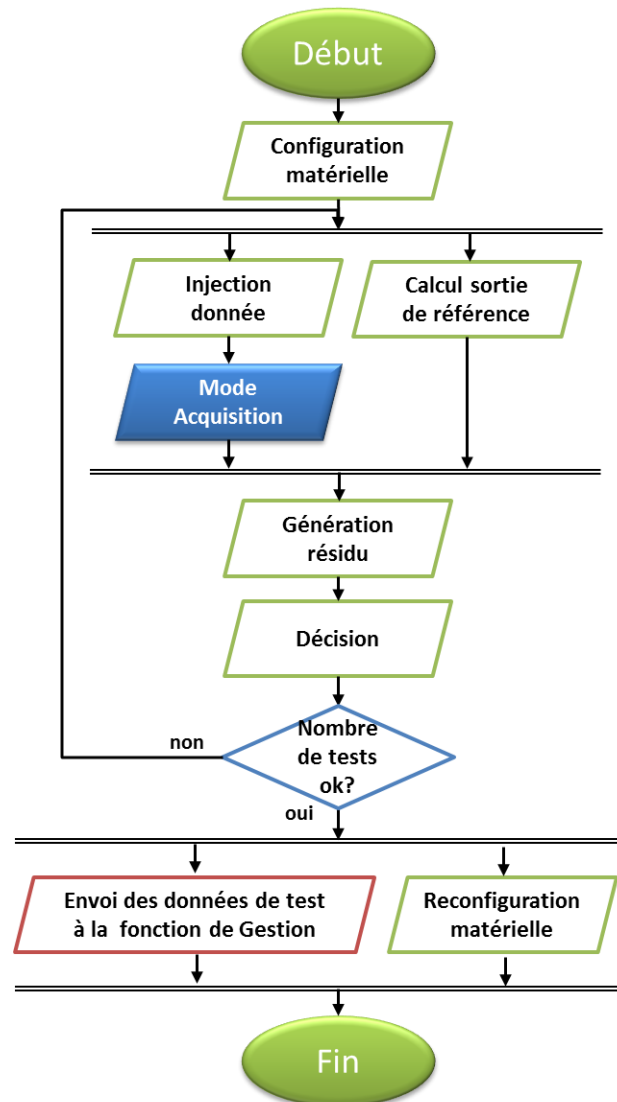


Figure III-22. Fonctionnement du mode de détection de défauts

D.4. Mode d'identification de défauts

Le mode d'identification de défauts a pour objectif de calculer et de communiquer la valeur des paramètres ayant évolué. Le succès de ce mode impacte directement sur la connaissance de l'intégrité des données, c'est-à-dire que :

- soit les défauts sont identifiés et les valeurs des paramètres sont recalculées, dans ce cas le mode d'acquisition classique proposera une valeur de sortie compensée, et le mode de détection intégrera les nouveaux paramètres pour limiter la détection à de nouveaux défauts uniquement,
- soit le mode ne parvient pas à recalculer les nouveaux paramètres dans le temps imparti, alors la CAC est considérée comme non intégrée.

Le mode d'identification de défauts est déclenché à partir d'un résultat positif de détection d'un défaut, émanant de l'étape de détection de défauts. Dans notre cas, l'identification de défauts se base sur le modèle mathématique de la CAC (le même que celui du mode précédent), et un algorithme génétique borné (présenté en *III.3 Mode d'identification par les algorithmes génétiques*). Il utilise les données de test (données de référence en entrée, données de sortie mesurées, et données de sorties calculées), ainsi que les derniers paramètres recalculés (le cas échéant, les paramètres initiaux) comme informations d'entrée.

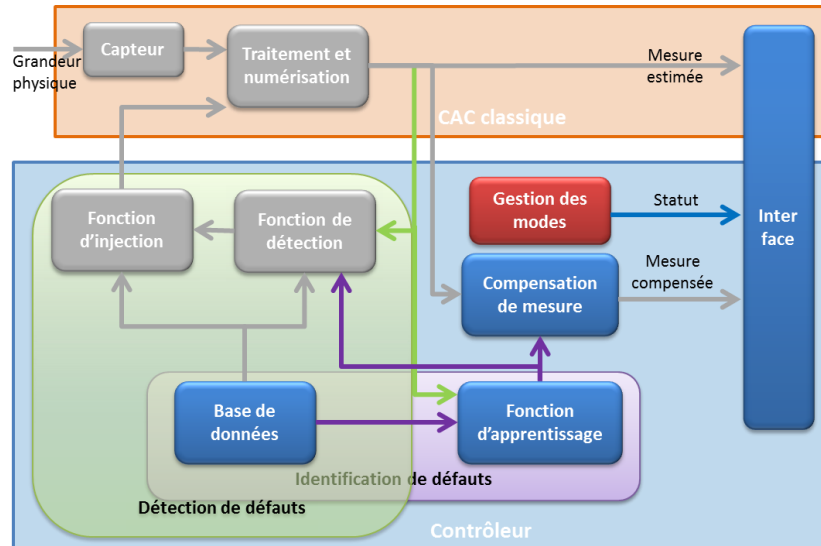


Figure III-23. Mode d'identification des défauts

Tel que le diagramme en Figure III-24 le présente, le mode d'identification acquiert les données de test, initialise et exploite les algorithmes génétiques bornés, puis renvoie l'état de succès et les nouveaux paramètres s'il y en a. Dans le cas où une solution a été calculée, une notification de succès et les nouveaux paramètres sont transmis à la fonction de gestion (qui les communiquera aux autres modes lors de leur utilisation). Le cas échéant seule une notification d'échec est transmise, et les derniers paramètres ayant été calculés sont conservés en mémoire et continuent d'être exploités.

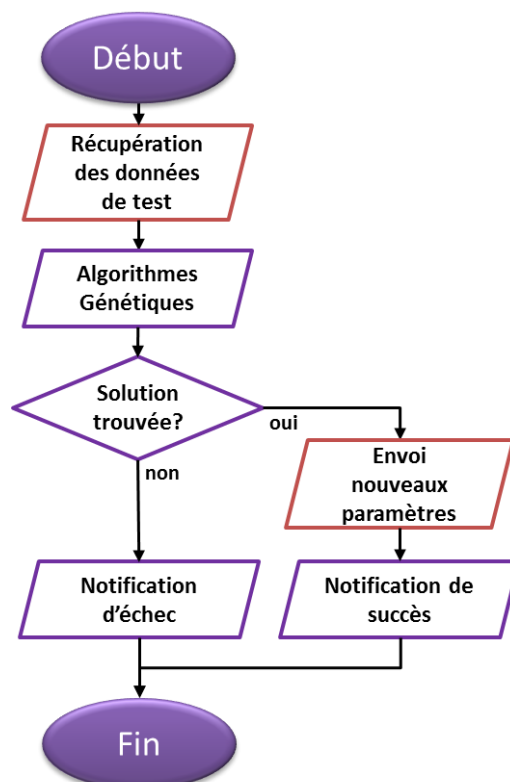


Figure III-24. Fonctionnement du mode d'identification de défauts

D.5. Optimisation de la détection de défauts

A partir du principe initial de la détection de défauts illustré par la Figure III-2 et des apports du mode d'identification de défauts, il est possible d'améliorer le mode de détection de défauts. L'amélioration s'oriente sur l'aptitude de la détection de défaut à ne détecter que les nouveaux défauts au lieu des anomalies par rapport au modèle initial, ainsi que l'illustre la Figure III-25. Cette amélioration s'implémente par l'utilisation des derniers paramètres recalculés afin de générer une sortie qui compense déjà les défauts précédemment identifiés.

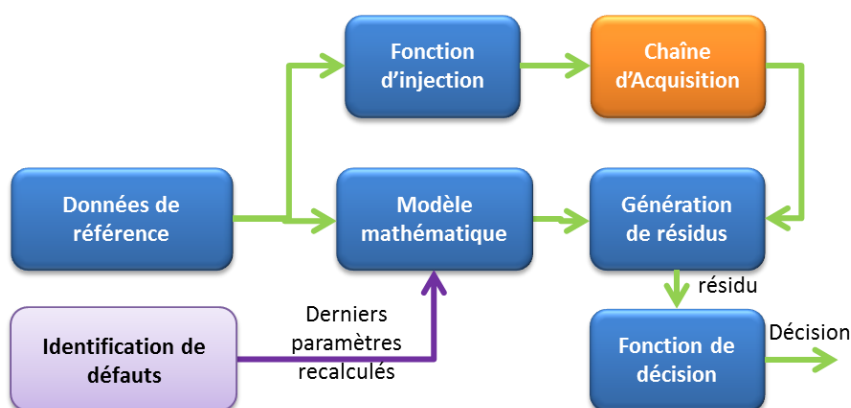


Figure III-25. Principe de la détection de défauts

De ce fait, l'utilisation des fonctions de la CAC relative à l'activation du mode de détection présenté par la Figure III-21, intègre les derniers paramètres recalculés ainsi que l'illustre la Figure III-26.

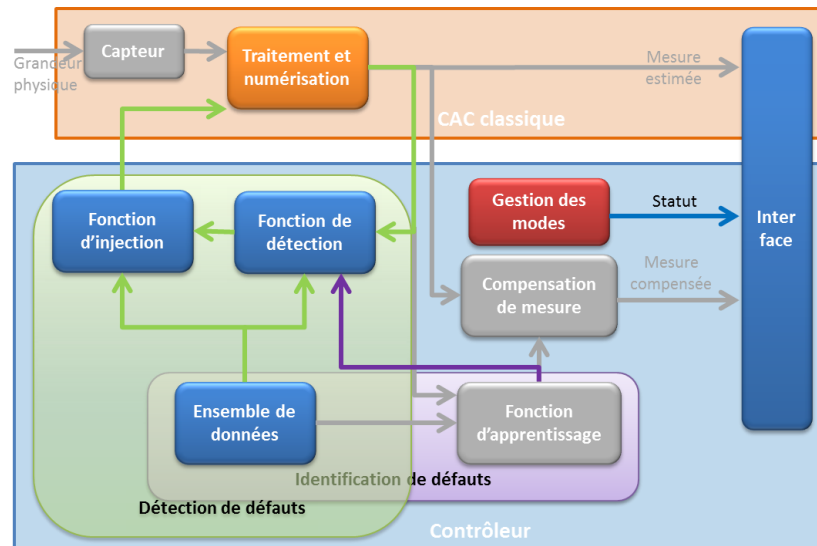


Figure III-26. Mode de détection des nouveaux défauts

E. Cas d'application

Ce sous-chapitre a pour objectif de présenter la solution proposée à travers la sélection des blocs physiques implémentés (adaptation du signal) et des fonctions de détection et d'identification de défauts (FDI) mis en œuvre sur un cas particulier et généralisable. Nous élaborons la représentation mathématique de la CAC et du capteur utilisé, puis nous calculons la fonction inverse de la CAC, nécessaire pour le fonctionnement de la FDI. Enfin, nous présentons le banc de test qui nous permet de valider par l'expérimentation les théories développées.

E.1. Présentation de la Chaîne d'Acquisition Capteur mise en œuvre

E.1.1. Rappel du cas d'application sélectionné

Le cas d'application de notre démonstrateur technique concerne la mesure de température de circuit carburant d'une turbomachine. Pour cela, nous avons sélectionné le capteur de température RTD, ainsi que les exigences du CdCF relatives à la conception de cette chaîne de mesure. Par souci de confidentialité, les exigences du CdCF ne peuvent être présentées dans de ce manuscrit.

E.1.2. Rappel du schéma bloc de la CAC

A partir de l'état de l'art présenté dans le chapitre I et des exigences du CdCF, la Figure III-27 illustre le schéma fonctionnel sélectionné.

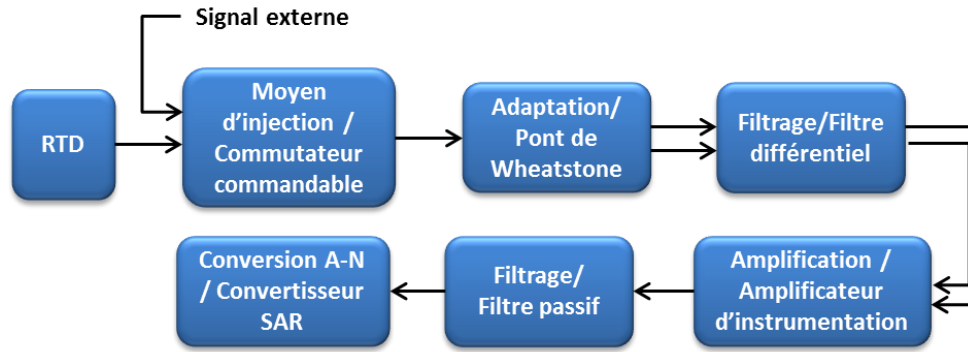


Figure III-27. Schéma fonctionnel du cas d'application à la température

Dans notre cas d'application, nous nous sommes concentrés sur la mesure de température par un capteur de type Pt1000, dont l'équation régissant le fonctionnement s'écrit de la manière suivante :

$$R_{(T)} = R_0 \times (1 + \alpha(T - T_0)) \quad \text{III-3}$$

Avec

- α le coefficient de température de la sonde,
- R_0 la résistance nominale à la température T_0 ,
- T_0 la température de référence,
- T la température à mesurer.

E.1.3. Etage d'adaptation : Pont de Wheatstone

L'étage d'adaptation est un pont de Wheatstone déséquilibré, présenté en Figure III-28, dont le but est de fournir une tension de sortie évoluant entre deux valeurs positives minimale et maximale, qui correspondent respectivement aux températures minimale et maximale de la plage de mesure du capteur. L'implémentation d'un pont de Wheatstone permet une meilleure linéarisation du signal de sortie du capteur, et son déséquilibre apporte l'aptitude à l'utilisateur final de détecter les défauts francs. La Figure III-28 synthétise l'état du signal de sortie de la CAC en cas de court-circuit ou de circuit ouvert pour chacune des résistances du pont ($R_2=R_{RTD}$).

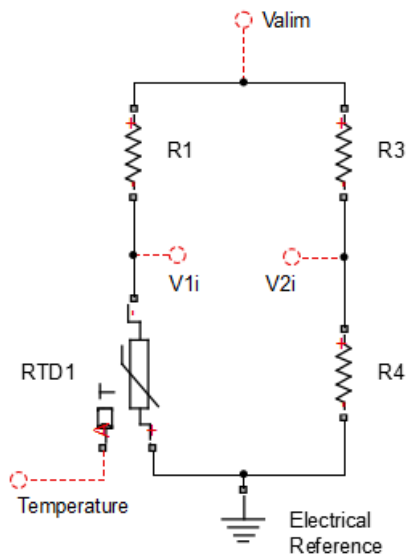


Tableau III-4. Impact des défauts francs du pont sur le signal de sortie

Etat	Court-circuit	Circuit ouvert
R ₁	V _{out} > V _{max}	V _{out} > V _{min}
R _{RTD}	V _{out} > V _{min}	V _{out} > V _{max}
R ₃	V _{out} > V _{min}	V _{out} > V _{max}
R ₄	V _{out} > V _{max}	V _{out} > V _{min}

Figure III-28. Schéma électrique d'un pont de Wheatstone

A titre d'exemple, la Figure III-29 illustre l'idée mise en place pour faciliter la détection de défauts francs au sein de l'étage d'adaptation. Ainsi, pour une température évoluant entre -30°C et +130°C, nous n'utilisons pas l'intégralité de la plage de conversion du CAN. Dès qu'un défaut franc apparaît au sein de l'étage d'adaptation la sortie de l'amplificateur sature, et le gradient du signal est trop élevé pour être considéré comme une variation normale de la température. Avec :

- T : la température à mesurer
- R_{rtd} : la valeur ohmique du capteur de température
- V_m : la tension en sortie de l'adaptation
- V_{amp} : la tension en sortie de l'amplification
- digit_{out} : la valeur numérique de la température

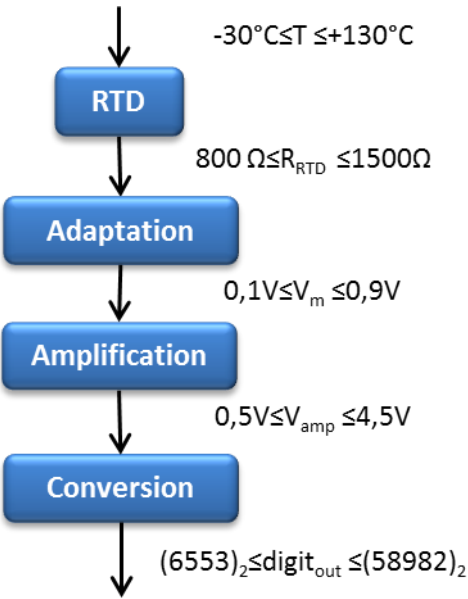


Figure III-29. Représentation des contraintes de la plage de sortie de la CAC

Ainsi l'équation III-4 décrit l'évolution de la sortie du pont de Wheatstone en fonction de son entrée.

$$(V_{1i} - V_{2i}) = V_{a\lim} \times \frac{R_{(T)} \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R_{(T)} + R_1) \times (R_3 + R_4)} \quad \text{III-4}$$

E.1.4. Etage de filtrage : filtre différentiel

Le premier étage de filtrage a pour objectif de préfiltrer le bruit sur le signal de mesure avant l'amplification. Par souci d'optimisation de la CAC, le filtrage est réalisé par un montage RC classique afin de limiter les éléments trop sensibles aux dérives paramétriques comme ce serait le cas pour un filtre actif. Ainsi, un filtre passif à l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, d'être peu coûteux en termes de composants, et de proposer des performances suffisantes au regard de nos spécifications techniques tandis qu'un filtre actif est plus complexe à mettre en œuvre avec des performances bien au-delà de nos besoins, et les risques de défauts augmentent avec le nombre de composants.

De plus, nous implémentons un filtre différentiel afin de s'affranchir d'un des modes communs (la masse commune à tous les systèmes électriques de la turbomachine). Le premier filtrage est donc un filtre passif différentiel de premier ordre, d'une fréquence de coupure de 20-25Hz (spécifications de notre cas d'étude) : il s'agit de l'agrégation de deux filtres passifs RC du premier ordre [CAS 96]. Les trois étapes présentées par la Figure III-30 et l'équation ci-dessous résument la transformation effectuée.

Calcul de la capacité équivalente : $C_5 = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$ III-5

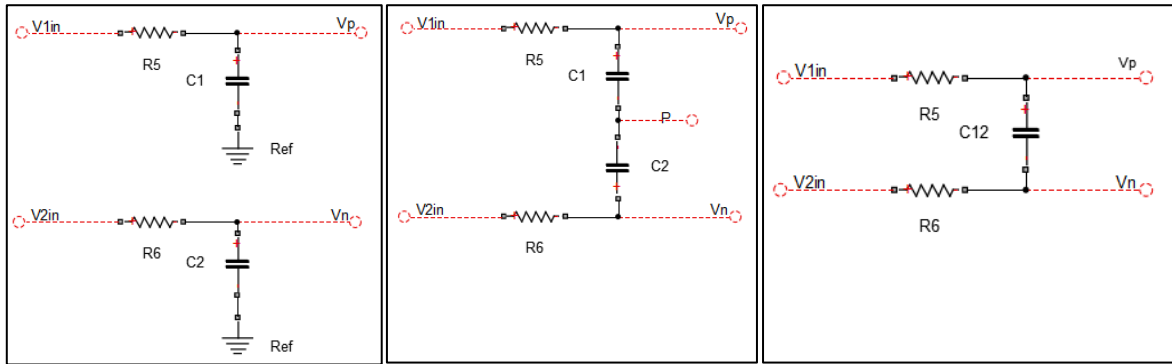


Figure III-30. Conception d'un filtre différentiel (3 étapes)

Par conséquent, l'équation III-6 correspond à la fonction de transfert de notre filtre différentiel, avec le déterminant décrit en III-7.

$$\begin{pmatrix} V_p \\ V_n \end{pmatrix} = \frac{1}{\det(M)} \times \begin{pmatrix} 1 + R_6 \times C_{12} \times s & R_5 \times C_{12} \times s \\ R_6 \times C_{12} \times s & 1 + R_5 \times C_{12} \times s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_{1i} \\ V_{2i} \end{pmatrix} \quad \text{III-6}$$

Avec:

- R_5 la résistance de la branche positive du filtre
- R_6 la résistance de la branche négative du filtre
- C_{12} : la capacité équivalente du filtre

- Le determinant:

$$\det(M) = 1 + (R_5 + R_6) \times C_{12} \times s \quad \text{III-7}$$

E.1.5. Etage d'amplification : Amplificateur d'instrumentation

L'étage d'amplification vise à accroître la valeur du signal de mesure afin de profiter au mieux de la pleine échelle de l'étage de conversion analogique-numérique. Le composant utilisé est un amplificateur d'instrumentation, qui assure une bonne maîtrise de l'amplification du signal en limitant le bruit ajouté par cet élément. L'équation III-8 décrit de manière simple le comportement de l'amplificateur.

$$V_{amp} = (V_{offOA} + (V_p - V_n)) \times G_{OA} \quad \text{III-8}$$

Dont le gain G_{OA} est proportionnel à la valeur de la résistance connectée en entrée, et modélisé par l'équation III-9.

$$G_{OA} = 1 + \frac{R_{OA1} + R_{OA2}}{R_G} \quad \text{III-9}$$

E.1.6. Etage de filtrage passif

Le second filtrage vise à réduire les bruits amplifiés par l'opération d'amplification, il se situe donc à la sortie de l'étage d'amplification et se compose d'un filtre passe-bas ($20\text{Hz} < f_c < 25\text{Hz}$) de premier ordre également, dont la fonction de transfert III-10 s'écrit :

$$H_{(j\omega)} = \frac{V_{filt(j\omega)}}{V_{amp(j\omega)}} \approx \frac{1}{j\omega + \frac{1}{R \times C}} \quad \text{III-10}$$

E.1.7. Etage de conversion A-N

L'étage de conversion Analogique/Numérique est réalisé par un convertisseur de type SAR, d'une précision de 16 bits. Cette précision est due aux hautes performances des composants utilisés pour compenser les pertes de précision à venir. Par exemple, si théoriquement une mesure nécessite une précision sur 14 bits, un convertisseur 16 bit sera utilisé pour se garantir une marge de sécurité de 2 LSB. Les convertisseurs analogique-numérique SAR et Σ - Δ sont les plus utilisés dans le domaine de l'aéronautique, pour des raisons d'accessibilité aux caractéristiques de ces convertisseurs. Dans notre cas, c'est le convertisseur SAR qui a été sélectionné.

Afin de s'assurer de l'exactitude de la fonction de transfert de notre modèle mathématique, nous avons modélisé et simulé le CAN SAR de 16 bits jusqu'au niveau de ses portes logiques, présenté dans l'annexe *Architecture du convertisseur A/N de type SAR*. Ainsi la fonction de transfert du CAN mis en œuvre se présente sous la forme :

$$digit_{out} = \frac{(V_{filt} + V_{off_adc}) \times G_{adc}}{q_{adc}} \quad \text{III-11}$$

Avec le pas de quantification q_{adc} équivalent à :

$$q_{adc} = \frac{FS}{2^N - 1} \quad \text{III-12}$$

Le second étage de conversion Numérique/Analogique est mis en place par un convertisseur SAR également, d'une précision de 16 bits. Le type et la précision de ce composant sont similaires à ceux des CNA intégrés dans la plupart des FPGA utilisés dans l'avionique, ce qui donnera la possibilité d'exploiter directement le CNA du FPGA qui contiendra nos fonctions. Sa fonction de transfert est l'inverse de celle du CAN :

$$V_{out} = \frac{q_{dac} \times digit_{in}}{G_{dac}} - V_{off_dac} \quad \text{III-13}$$

E.2. Modélisation de la fonction inverse

Le modèle mathématique de la CAC regroupe l'ensemble des équations régissant chacun des blocs fonctionnels présentés ci-dessus. Cependant, nous modélisons les filtres sous la forme de coefficients multiplicateurs légèrement inférieurs à 1 pour les raisons suivantes :

- La fréquence d'évolution du signal à mesurer est inférieure à la fréquence de coupure des filtres, en prenant en compte le théorème de Shannon,
- les dérivées des résistances et des capacités des filtres ne sont pas prises en compte dans notre étude (les défauts ciblés sont présentés dans le chapitre 2)
- les valeurs des résistances du filtre différentiel sont identiques

De ce fait, les équations III-14 et III-15 décrivent la transformation des modèles des deux filtres, les valeurs des coefficients seront déterminées de façon empirique lors des expérimentations.

$$\text{Filtre différentiel : } (V_p - V_n) = (V_{1i} - V_{2i}) \times K_{fd} \quad \text{III-14}$$

avec K_{1i} et K_{2i} les valeurs d'abaissement de la tension du filtre différentiel.

$$\text{Filtre simple: } V_{filt} = V_{amp} \times K_{filt} \quad \text{III-15}$$

avec K_{filt} l'abaissement de la tension dû au filtre simple.

E.2.1. Modèle mathématique de la CAC

A partir des équations précédentes, le modèle mathématique de la CAC correspond à l'équation III-16.

$$digit_{out} = \frac{G_{adc}}{q_{adc}} \times \left[\left(V_{offOA} + V_{alim} \times \frac{R(T) \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R(T) + R_1) \times (R_3 \times R_4)} \times K_{fd} \right) \times G_{OA} \times K_{filt} + V_{offadc} \right] \quad \text{III-16}$$

E.2.2. Fonction inverse de la CAC

La fonction inverse de la CAC se base sur la fonction de transfert III-16, ainsi les équations III-17 à III-20 correspondent au modèle mathématique inverse de chaque bloc fonctionnel de la CAC.

Tension en entrée du convertisseur A/N :

$$V_{filt} = digit_{out} \times \frac{q_{adc}}{G_{adc}} - V_{offadc} \quad \text{III-17}$$

Tension en entrée du filtre simple:

$$V_{amp} = \frac{digit_{out} \times \frac{q_{adc}}{G_{adc}} - V_{offadc}}{K_{filt}} \quad \text{III-18}$$

Tension en entrée de l'amplification:

$$(V_{1i} - V_{2i}) = \frac{digit_{out} \times \frac{q_{adc}}{G_{adc}} - V_{offadc}}{K_{filt} \times G_{OA}} - V_{offOA} \quad \text{III-19}$$

Dans notre cas d'étude, implémenté dans le chapitre 4, le signal de référence est injecté au niveau de la branche de la sonde RTD du pont de Wheatstone. En effet, nous plaçons le commutateur de sorte que ses deux entrées soient : la branche avec la rtd du pont, ou la sortie du signal d'injection. Par conséquent, notre modèle mathématique inverse doit permettre de retrouver la valeur de la tension injectée. Ainsi, il nous faut connaître la tension fixe sur la seconde branche du pont de Wheatstone, celle-ci se présente sous la forme de l'équation III-20.

Tension en entrée de la borne négative du filtre différentiel (sortie de la branche de référence du pont de Wheatstone) :

$$V_{2i} = V_{alim} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{III-20}$$

De ce fait, le modèle de la fonction inverse de notre CAC s'écrit de la manière suivante:

$$V_{1i} = \frac{digit_{out} \times \frac{q_{adc}}{G_{adc}} - V_{offadc}}{K_{filt} \times G_{OA}} - V_{offOA} - V_{alim} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{III-21}$$

E.2.3. Fonction de décision

L'estimation du seuil de la fonction de décision se détermine à partir des modèles mathématiques du capteur utilisé et de notre CAC, tels que décrit par les équations III-22 et III-23. L'objectif est de déterminer la valeur numérique de l'écart de précision pour l'ensemble de la plage de mesure.

$$R_{(T)} = R_0 \times (1 + \alpha(T - T_0)) \quad \text{III-22}$$

$$digit_{out} = \frac{q_{adc}}{q_{adc}} \times \left[\left(V_{offOA} + V_{alim} \times \frac{R_{(T)} \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R_{(T)} + R_1) \times (R_3 \times R_4)} \times K_{fd} \right) \times G_{OA} \times K_{filt} + V_{offadc} \right] \quad \text{III-23}$$

Prenons l'exemple d'une mesure de température sur une plage de -50°C à $+130^\circ\text{C}$ avec une précision exigée à $\pm 2^\circ\text{C}$. Nous mettons en œuvre une sonde RTD avec une CAC telle que présentée dans le chapitre précédent. Par calcul de la précision exigée de l'ensemble de la CAC implémentée, la Figure III-31 illustre l'écart en bit pour une variation de 2°C sur l'ensemble de la plage de mesure. Nous constatons que l'écart de la valeur numérisée de sortie n'est pas le même sur l'ensemble de la plage de mesure, ce phénomène est dû à la non linéarité de la réponse du capteur.

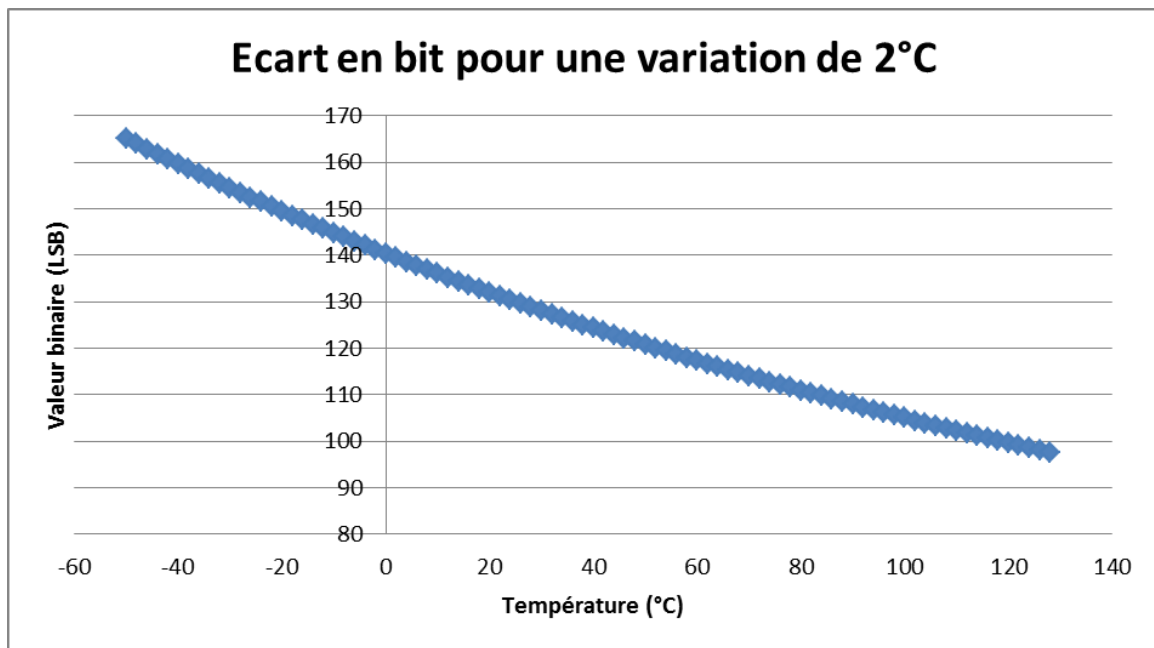


Figure III-31. Ecart en bit pour une variation de 2°C

De ce fait, lors de la phase de détection de défaut, si l'écart entre la valeur de référence acquise et la valeur de référence attendue est supérieur au seuil, alors un défaut est détecté. Par la suite, le seuil est fixé à 165LSB (12mV) de façon à convenir à toute la plage de mesure de température. Bien évidemment, nous pouvons réduire le seuil à la valeur de tolérance minimale de 96 LSB, ce qui aura pour conséquence l'augmentation de la rapidité de détection et du taux de fausses alarmes (et donc du lancement du mode d'identification des défauts).

E.3. Structure du banc de test

L'objectif de notre banc de test est de valider par l'expérimentation l'architecture physique ainsi que les fonctions de détection et d'identification de défauts mises en œuvre. Le banc de test illustré Figure III-32 se compose des éléments suivants :

- Notre Chaîne d'Acquisition Capteur instrumentée
- Le programme de gestion des modes

- Les algorithmes de détection, d'identification, et de compensation des défauts
- La routine de test intégrant l'ensemble des stimuli à injecter et le comportement attendu du système

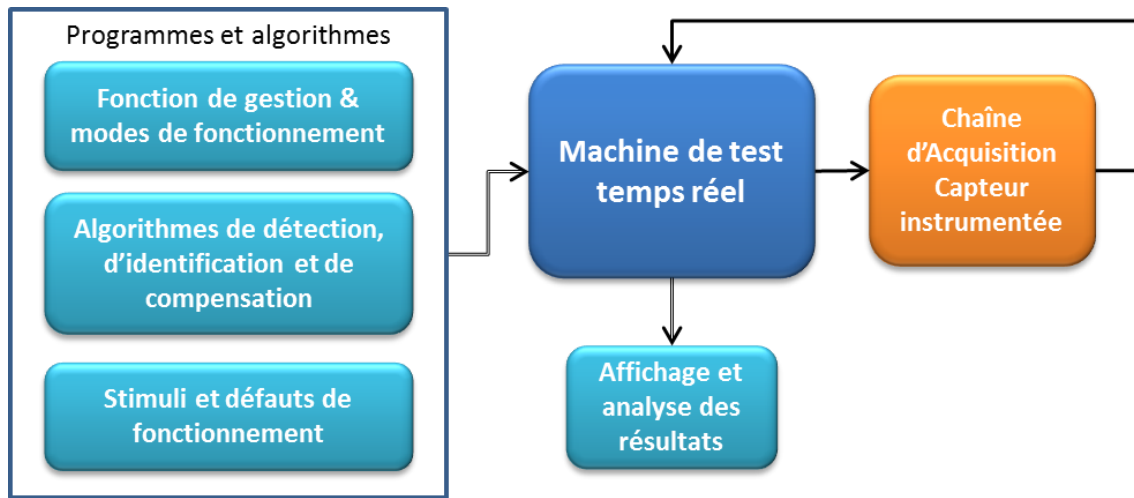


Figure III-32. Représentation fonctionnelle du banc de test

Dans le chapitre suivant, nous présentons le banc de test ainsi que les résultats d'expérimentation.

F. Synthèse

Dans ce troisième chapitre nous avons présenté les apports de notre architecture, ainsi que sa mise en œuvre. L'architecture de la solution présentée se base sur les exigences de notre cas d'application: l'acquisition d'une grandeur physique, de type température ou pression, d'une turbomachine. Le haut niveau de criticité et le degré intermédiaire de complexité de notre cas d'application, rendent notre architecture généralisable à d'autres CAC (pression, couple, vitesse, position), de niveaux de criticité équivalent ou moindre.

La mise en place du rebouclage autour de la CAC pour la détection de défauts est l'un des points majeurs de cette solution puisqu'elle permet la surveillance des défauts ciblés en limitant l'intrusivité dans la CAC. Cette initiative met également en avant l'impact de la température sur l'efficacité de notre moyen de détection de défaut [MAR 13]. Le second point majeur se situe au niveau du moyen d'identification des défauts et de sa mise en œuvre. L'intégration des algorithmes génétiques bornés rend apte, de manière locale, notre système à identifier les défauts et à proposer des nouveaux paramètres pour compenser les dérives. De plus, les algorithmes génétiques donnent la possibilité de localiser les défauts, en comparant les valeurs initiales avec les valeurs identifiées de chacun des paramètres surveillés. Cette aptitude pourra permettre une utilisation du système pour de la prévision de défaut, qui est l'une des étapes de la maintenance prévisionnelle (en remplacement de la maintenance périodique). Enfin, la capacité d'adaptation des algorithmes génétiques permet d'envisager leur utilisation pour la surveillance de systèmes plus complexes que le nôtre, voire non linéaires, au prix d'une augmentation des temps de calcul.

L'étude du modèle mathématique de la CAC a permis la mise en évidence de certaines simplifications, sans oblitérer les solutions techniques déjà existantes dans ce genre de système. Enfin, nous avons abordé la manière dont nous validerons à la fois la représentation

mathématique de notre CAC et les algorithmes implémentés pour la FDI à travers la conception, la réalisation, et l'exploitation d'un banc d'essais.

Chapitre IV - Validation et résultats expérimentaux

IV.	Validation et résultats expérimentaux	98
A.	Réalisation du banc d'essais	99
B.	Plan d'expérience	99
B.1.	Réalisation de la CAC instrumentée	100
B.2.	Logiciels du banc de test	106
B.3.	Aperçu du banc de test.....	110
C.	Résultats expérimentaux.....	110
C.1.	Signaux de test de la CAC instrumentée	110
C.2.	Validation du fonctionnement de la CAC instrumentée	111
C.3.	Expérimentations avec injection des défauts.....	111
C.4.	Synthèse des résultats.....	117
D.	Perspectives de développement du banc	118
D.1.	Travaux à court termes.....	118
D.2.	Explications pour le CAN	118
E.	Synthèse	119

A. Réalisation du banc d'essais

Le banc d'essais, dont la structure est présentée en fin du chapitre précédent, se compose des trois éléments suivants :

- CAC instrumentée pour simuler l'injection de défauts
- Machine de test temps réel
- Logiciels du banc de test

Le banc d'essais se compose de trois principaux éléments, qui sont le prototype de la CAC, la machine de test temps réel, et les programmes d'essais et de gestion des modes de fonctionnement. Afin de répondre aux exigences du plan d'expérience, la CAC se doit d'être instrumentée, la machine temps réel doit être adaptable aux multiples phases de test, et les programmes d'essais et de gestion doivent être aisément portables sur la machine-cible, enfin les ressources de calcul et de stockage nécessaires pour son fonctionnement doivent être quantifiables.

Il faut préciser qu'il était nécessaire de réaliser un plan d'expérience afin d'identifier les mécanismes d'injection de défaut à intégrer au prototype de la CAC, ainsi que les programmes de test à développer.

B. Plan d'expérience

En premier lieu, le plan d'expérience nous amène à concevoir la CAC de manière à valider le modèle mathématique, puis à le calibrer. En second lieu, le plan d'expérience vise à évaluer la pertinence des modes de fonctionnement et de l'utilisation des algorithmes génétiques comme moyen d'identification de défauts.

Nous souhaitons étudier l'influence des dérives paramétriques sur le comportement de la CAC, telles qu'identifiées dans le chapitre 2, ainsi que la réponse de la CAC face à ces dérives.

Nous décomposons les observations en deux phases : l'observation des blocs fonctionnels de la CAC, puis de son ensemble, et l'observation du comportement de l'architecture (CAC et modes de fonctionnement + compensation) lors de l'injection des dérives paramétriques.

Les observations des deux phases doivent mettre successivement en avant la correspondance du comportement des modèles mathématiques par rapport à leur bloc fonctionnels. Puis le comportement de l'architecture dans son ensemble, et donc la pertinence des modes de fonctionnement mis en œuvre. La pertinence de la détection de défauts s'évalue par rapport au franchissement du seuil de tolérance pour une valeur de dérive donnée. La pertinence de l'identification de défauts s'évalue par rapport au suivi du comportement des paramètres recalculés vis-à-vis des paramètres qui dérivent. Plus l'évolution des paramètres recalculés est similaire à celle des paramètres qui dérivent, plus la fonction d'identification de défauts est optimale. La pertinence de la fonction de compensation s'évalue par la différence entre la valeur de sortie théorique (i.e. sans défauts) et la valeur de sortie compensée.

Les résultats finaux doivent montrer la capacité de l'architecture proposée à être plus tolérante aux défauts, quelle que soit leur évolution.

Les conditions d'expérimentation correspondent à une pression atmosphérique normale ainsi qu'une température ambiante stable autour de +20°C, dans un environnement de type laboratoire (propre en CEM et en fréquences parasites), avec une alimentation de laboratoire stable et maîtrisée.

De ce fait, l'instrumentation du prototype de Chaîne d'Acquisition Capteur nécessite d'intégrer un jeu de mécanisme d'injection de défauts supplémentaires. Ainsi que l'illustre la Figure IV-1, ces mécanismes sont physiquement implémentés au sein du prototype mais ils sont commandés par la machine de test temps réel afin de maîtriser au mieux ces défauts.

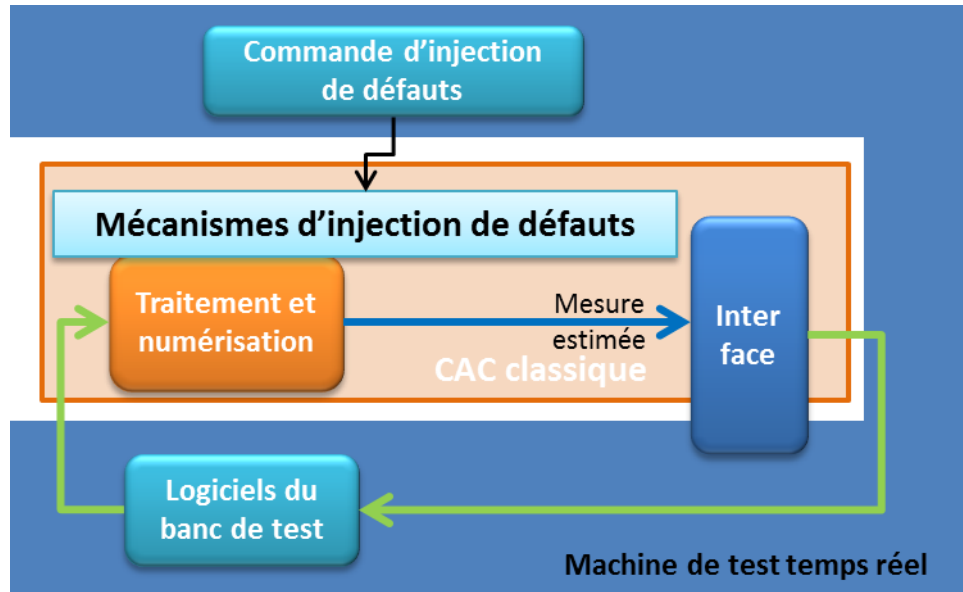


Figure IV-1. Schéma du banc de test avec mécanismes d'injection de défauts

B.1. Réalisation de la CAC instrumentée

La conception de la CAC instrumentée s'appuie à la fois sur les exigences du plan d'expérience, et les contraintes de conception spécifiques au domaine aéronautique. Enfin, le dimensionnement de la CAC s'appuie sur le modèle mathématique présenté à la fin du chapitre 3 qui est la base du prototype à intégrer au banc d'essais. Enfin, les besoins d'instrumentation de la CAC liés au prototypage à mettre en œuvre ont été identifiés par le plan d'expériences.

B.1.1. Simulation et injection des défauts

Afin de valider le modèle mathématique et de le calibrer, la CAC doit pouvoir séparer physiquement chacun des blocs fonctionnels (adaptation, filtres, amplification, et conversion analogique-numérique). Ainsi que l'illustre la Figure IV-2, un commutateur trois positions est intégré entre chacun des blocs fonctionnels permettant de : relier les deux blocs fonctionnels voisins, d'acquérir la sortie du bloc en amont, ou d'injecter un signal à l'entrée du bloc en aval.

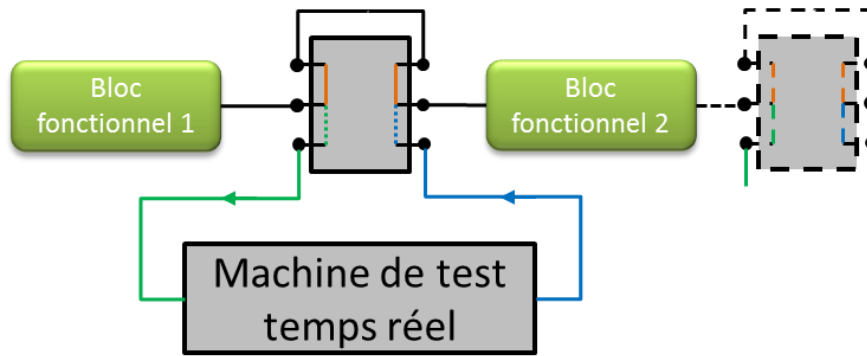


Figure IV-2. Commutateur inter-bloc fonctionnels

La position 1 (orange) permet la continuité du signal électrique entre les deux blocs fonctionnels. La position 2 (vert) permet l'acquisition de la sortie du premier bloc fonctionnel. La position 3 (bleu) permet l'injection d'un signal électrique en entrée du second bloc fonctionnel. Par exemple, dans le cas de la validation du second bloc fonctionnel, le premier commutateur serait en position 3 (injection) et le second commutateur serait en position 2 (acquisition). Le traitement permettant de passer le signal d'entrée à celui de sortie, est alors géré par la machine de test temps réel.

B.1.2. Machine de test temps réel

La machine de test temps réel remplit plusieurs fonctions au sein du banc de test. En premier lieu, elle initialise le prototype de la CAC instrumentée. Par la suite, elle génère les stimuli pour les essais à réaliser. Enfin, elle remplace le microcontrôleur nécessaire à la gestion des modes de fonctionnement et à l'exécution des fonctions intégrées à ces modes (détection de défauts, modèle mathématique inverse, identification de défauts, etc.). La machine de test doit posséder des performances de calcul et des ressources de stockage suffisamment vaste pour intégrer l'ensemble des programmes de test en plus de nos programmes.

Il existe de nombreux fournisseurs de machines de test temps réel répondant à nos critères tels que *DSPACE*, *National Instruments*, ou encore *Speedgoat*. Nous avons sélectionné la machine de test temps réel proposée par la société *Speedgoat*, cette machine intègre trois modules permettant de réaliser les différentes fonctions demandées:

- IO102 et IO108 pour l'acquisition et l'envoi de signaux analogiques
- IO311: pour la gestion des bus SPI qui paramètrent les mécanismes d'injection de défaut et acquiert les données en provenance du CAN

Ainsi, les principales caractéristiques techniques de la machine *Speedgoat* sont définies telles que:

- Processeur core i7 3770k, 3.5GHz
- RAM 4096Mo
- Fréquence de fonctionnement 33MHz
- Kernel spécifique *Speedgoat*

Tandis que le module IO 311 intègre un Virtex II de chez Xilinx, une mémoire SRAM de 256k X 36 bits et gère le bus SPI à une fréquence de 66MHz.

B.1.3. Aperçu de la CAC instrumentée

La Figure IV-3 est une photographie du prototype de notre CAC instrumentée, nous y avons identifié les cinq fonctions principales suivantes où :

- FP1 représente le pont de Wheatstone avec commande de défauts francs et la reconfiguration matérielle pour l'injection de données
- FP2 représente le filtre différentiel
- FP3 représente l'étage d'amplification avec gain et offset commandables
- FP4 représente le filtre passe-bas simple
- FP5 représente l'étage de conversion analogique-numérique avec offset commandable

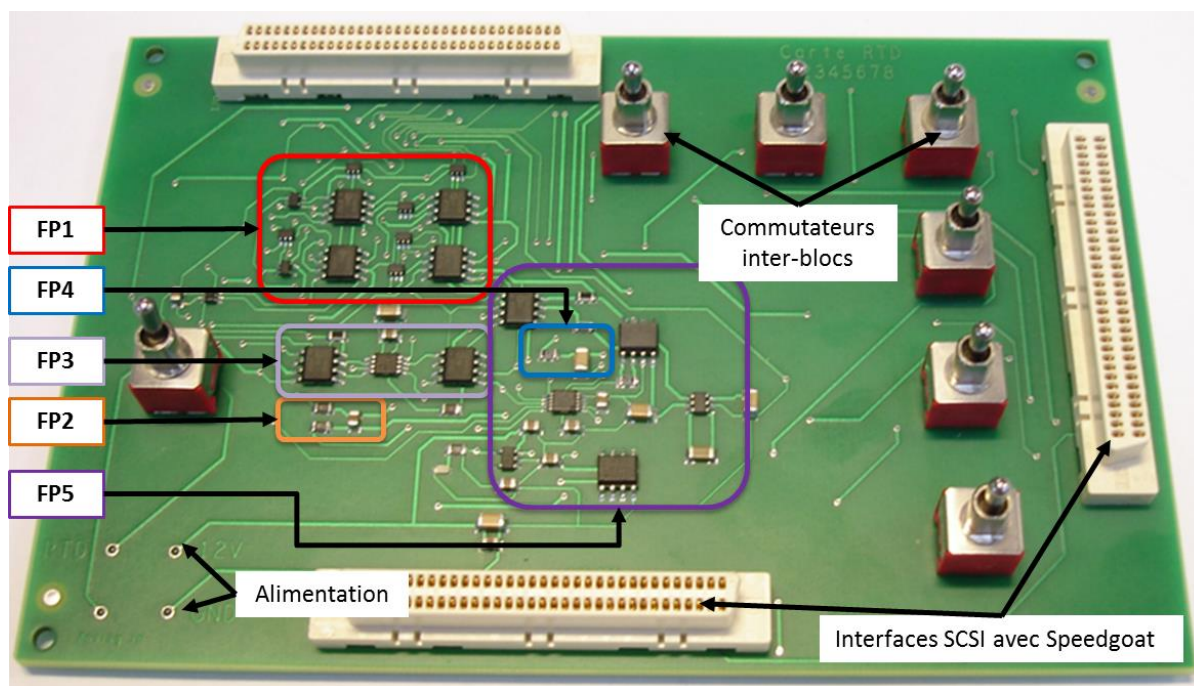


Figure IV-3. Photo de la CAC instrumentée

Pour estimer la pertinence des modes de fonctionnement et de l'utilisation des algorithmes génétiques, la CAC instrumentée doit pouvoir « recevoir » les défauts sur les paramètres surveillés. Ces défauts étant les gains et offset des étages d'amplification et de conversion analogique-numérique. Ainsi, les Figure IV-4 et Figure IV-5 illustrent l'injection de ces défauts au sein des blocs fonctionnels ciblés.

B.1.4. Modélisation des dérives de l'amplification

La Figure IV-4 représente l'intégration des moyens d'injection de défauts sur l'étage d'amplification. L'amplificateur utilisé est un amplificateur d'instrumentation différentiel

dont le gain s'exprime en fonction de la valeur de la résistance R_g , et l'offset est commandable et s'injecte sur la référence de l'amplificateur

Calcul du gain de l'étage d'amplification : $\mathbf{G_{OA} = 1 + \frac{49400}{R_g}}$ IV-1

La résistance équivalente du gain se compose d'une résistance en série et d'un potentiomètre numérique commandé par une liaison SPI (AD8400). Le réglage du potentiomètre correspond à la valeur 8 bit commandée par l'opérateur en temps réel.

$$\text{Calcul de la valeur de la résistance } R_g : R_{g(D)} = \frac{D}{256} * R_{AB} + R_w \quad \text{IV-2}$$

Avec D la valeur de commande du potentiomètre numérique, évoluant entre 0 et 255.

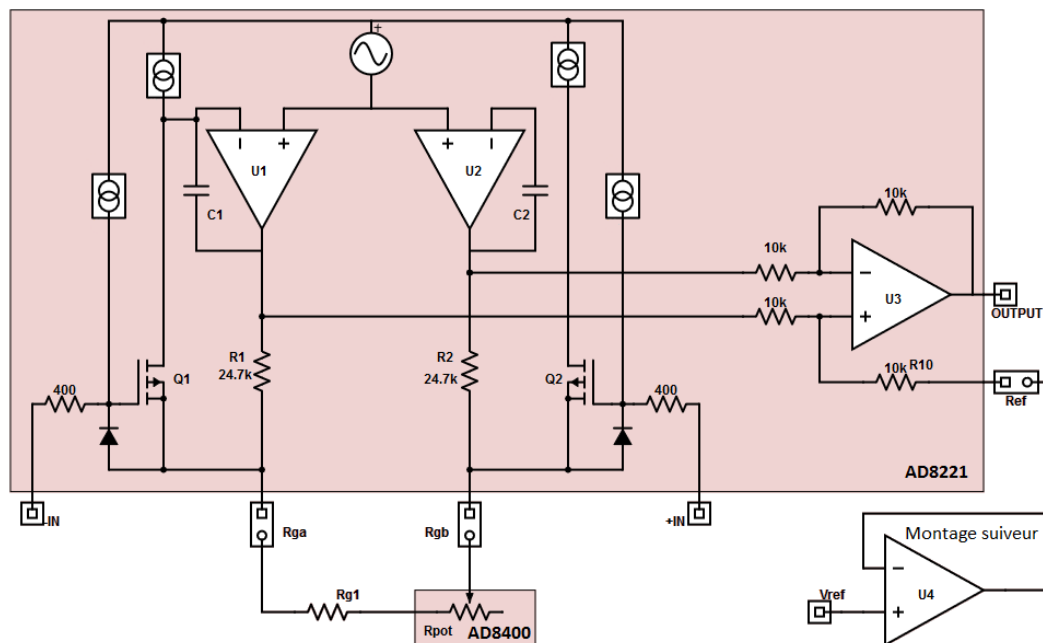


Figure IV-4. Illustration de l'injection des défauts sur l'étage d'amplification

B.1.5. Modélisation des dérives de la conversion

La Figure IV-5 représente le moyen d'injection d'offset sur le convertisseur analogique-numérique. Le composant étant dans son boîtier, nous ne pouvons influencer directement sur son gain interne. Cependant, la documentation du constructeur du composant décrit l'impact de l'évolution du gain en interne comme l'addition de bits de poids faible proportionnelle à la valeur de la tension analogique à convertir. Par conséquent, le défaut de gain sera simulé au sein de la machine de test temps réel, avant le traitement de la donnée par les fonctions des modes utilisés. La dérive de gain s'exprime selon l'équation **IV-3**.

$$out = entier(digit_{out} \times (1 + \Delta_{adc})) \quad \text{IV-3}$$

Avec Δ_{adc} la dérive de gain du convertisseur analogique-numérique.

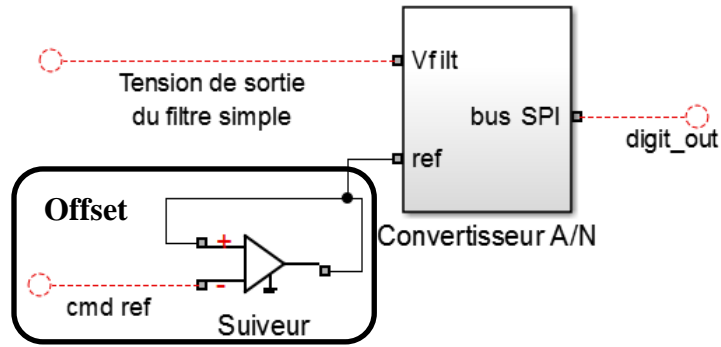


Figure IV-5. Illustration de l'injection de la dérive d'offset sur l'étage de conversion

La dernière étape est cruciale pour le bon fonctionnement du mode de détection de défaut, puisqu'il s'agit de l'aptitude de reconfiguration matérielle de la CAC instrumentée. En effet, la CAC instrumentée est équipée d'un pont de Wheatstone complet (quatre potentiomètres numériques), d'une entrée analogique spécifique, et d'une connexion à un convertisseur numérique-analogique. L'entrée analogique spécifique et le convertisseur numérique-analogique permettent l'injection de la tension de référence en entrée de la CAC. Dans notre cas nous utilisons uniquement l'entrée analogique qui reçoit la tension en provenance de notre machine de test temps réel. Dans l'idée d'augmenter le nombre de défauts commandables et au regard des retours d'expériences côté THALES, nous avons équipé les quatre résistances du pont de Wheatstone tel que l'illustre la Figure IV-6. Ces modules de reconfiguration du pont de Wheatstone permettent de commander la valeur du potentiomètre, ainsi que l'apparition de pannes franches en plus de l'aptitude de reconfiguration matérielle.

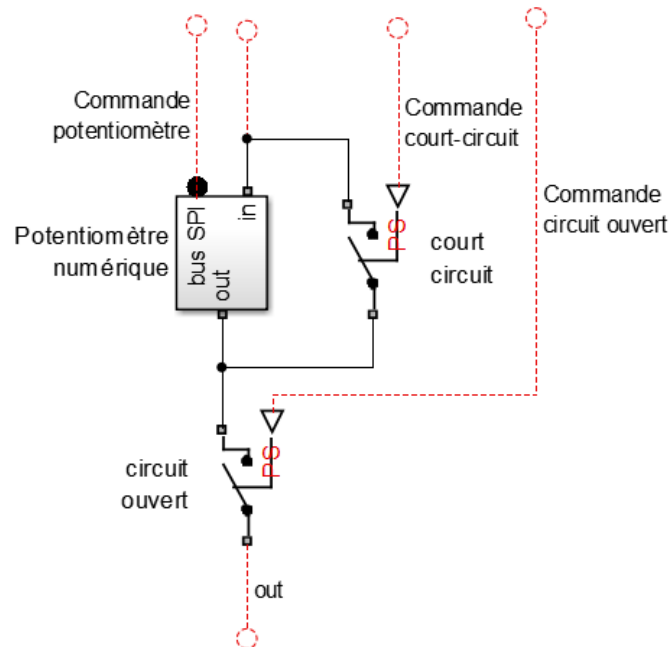


Figure IV-6. Illustration d'une résistance équivalente du pont de Wheatstone

Les dernières contraintes de conception s'axent autour de la facilité d'exploitation du banc de test et de la similitude entre la CAC instrumentée et les CAC actuellement implémentées au sein de systèmes aéronautiques critiques. De ce fait, l'automatisation de la gestion du banc de test à travers les injections de défauts et la commande des différents potentiomètres numériques intégrés est une nécessité. La CAC doit pouvoir fonctionner normalement en

remplaçant le capteur par un signal analogique maîtrisé, ou bien par l'utilisation d'un potentiomètre numérique qui simulerait le fonctionnement de la RTD. Enfin, chacun des composants utilisés pour la CAC doit être certifié pour une utilisation aéronautique. Cependant, cette contrainte ne concerne pas les moyens d'instrumentation de la CAC tels que : les commutateurs entre les blocs fonctionnels et les moyens d'injection de défauts (dérives et pannes franches).

B.1.6. Reconfiguration matérielle

Le pont de Wheatstone présente deux configurations possibles, dues aux modes de fonctionnement. D'une part, le mode d'acquisition qui exploite l'intégralité du pont de Wheatstone, où les deux branches du pont sont utilisées. D'autre part, le mode de détection de défauts, où la branche du pont intégrant le capteur est en circuit ouvert et remplacée par le moyen d'injection de la donnée de référence. Enfin, le mode d'identification n'étant pas tributaire de la configuration matérielle de la CAC, peut être exploité dans les deux cas. Ainsi, la Figure IV-7 illustre le pont de Wheatstone dans ses deux configurations, avec les valeurs des résistances et l'état des commutateurs. Nous avons profité de l'aptitude de reconfiguration du pont de Wheatstone pour y intégrer des moyens d'injection de défauts supplémentaires, qui puissent être exploités pour renforcer les résultats d'expérimentation. Afin de faciliter la lecture du schéma, les potentiomètres numériques ont été représentés par des résistances classiques.

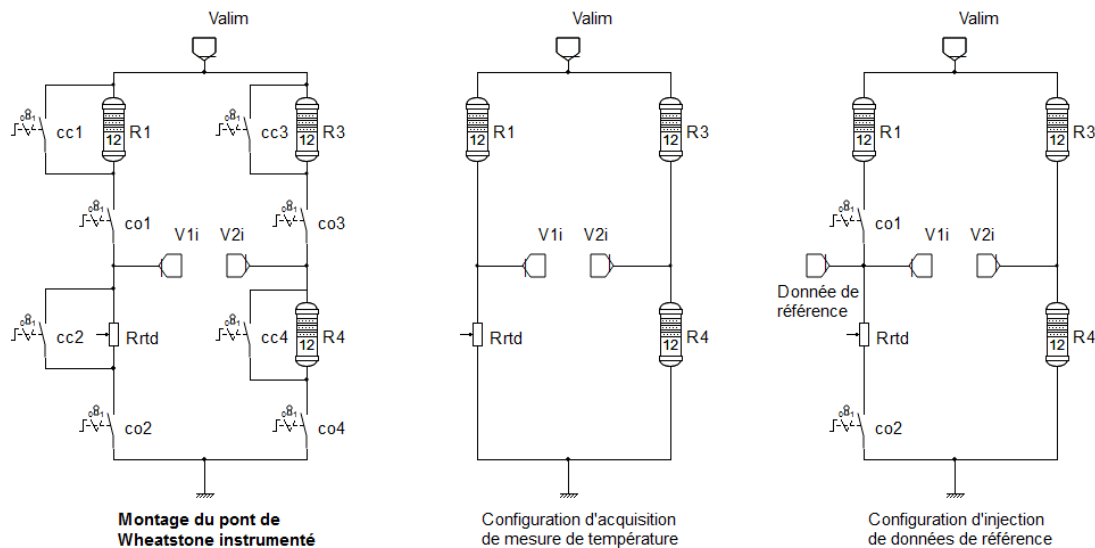


Figure IV-7. Configurations du pont de Wheatstone

Dans la Figure IV-7, le montage de gauche correspond au pont de Wheatstone instrumenté, il regroupe l'ensemble des composants utilisés. Au centre de la figure, le montage est configuré pour le mode d'acquisition de température par la sonde RTD. Dans cette configuration, les commutateurs de court-circuit (cc1 à cc4) sont ouverts, tandis que les commutateurs de circuit ouvert sont fermés (co1 à co4). À droite, le pont de Wheatstone est configuré pour le mode de détection de défauts et reçoit les données de référence en amont de la sonde RTD. Dans cette configuration, les commutateurs de court-circuit (cc1 à cc4) et les commutateurs co1 et co2 sont ouverts, la position de ces derniers permet de déconnecter la branche RTD du pont d'adaptation. Par conséquent, les commutateurs co3 et co4 sont fermés afin de garder la seconde branche du pont de Wheatstone active. Le u mode de fonctionnement actif.

Tableau IV-1 résume les configurations du pont de Wheatstone en fonction du mode de fonctionnement actif.

Tableau IV-1. Configuration des commutateurs en fonction du mode de fonctionnement

Mode de fonctionnement	Configuration	CC1	CC2	CC3	CC4	CO1	CO2	CO3	CO4
Acquisition	Pont entier	0	0	0	0	1	1	1	1
Détection de défauts	Injection des données de référence	X	X	1	1	0	0	1	1

Dans ce tableau, le niveau logique bas représente un commutateur ouvert, le niveau logique haut représente un commutateur fermé, et les 'X' représentent un état indifférent (ouvert ou fermé).

B.2. Logiciels du banc de test

L'ensemble des logiciels ont été élaborés dans le but de valider la CAC instrumentée, les algorithmes déployés, et la gestion des modes de fonctionnement. Nous distinguons les programmes génériques indispensables pour le fonctionnement basique du banc de test, des programmes de test spécifiques au processus de validation de notre CAC.

B.2.1. Logiciels génériques

Les logiciels génériques du banc de test, le programme d'essais et de gestion se compose de trois ensembles distincts tels que : la **configuration du Speedgoat et du prototype**, la gestion des **signaux de test**, et les **fonctions de la CAC instrumentée**.

La **configuration du Speedgoat** permet d'établir les limites de fonctionnement des modules utilisés (pleines échelles analogiques, valeurs en tension des seuils haut et bas, fréquence de fonctionnement du programme, etc.). **L'initialisation du prototype** permet de configurer la valeur des potentiomètres numériques, ainsi que l'état du pont de Wheatstone (câblage de mesure ou injection de données de références analogiques). Dans notre cas, le câblage de mesure permet les tests de la première phase d'observation, tandis que le câblage d'injection de données de références permet les tests de la seconde phase d'observation.

Les **signaux de test** se composent des stimuli à générer et de l'acquisition des sorties. Les stimuli générés correspondent aux défauts de fonctionnement au sein des blocs fonctionnels concernés, ainsi qu'aux données de références à injecter dans la CAC instrumentée. Ils évoluent tout au long du test, en fonction des commandes fournies au préalable par l'opérateur

B.2.2. Programmes spécifiques

Les programmes spécifiques correspondent aux fonctions de détection, d'identification, de compensation de défauts, et de gestion des modes de fonctionnement telles que présentées dans le chapitre 3. La fonction de gestion des modes de fonctionnement de notre banc de test est mise en œuvre sous forme de machine d'états développée sous Matlab/Simulink, via

Stateflow, telle que présentée par la Figure IV-8. Cette fonction de gestion correspond également au séquençement de fonctionnement du banc de test.

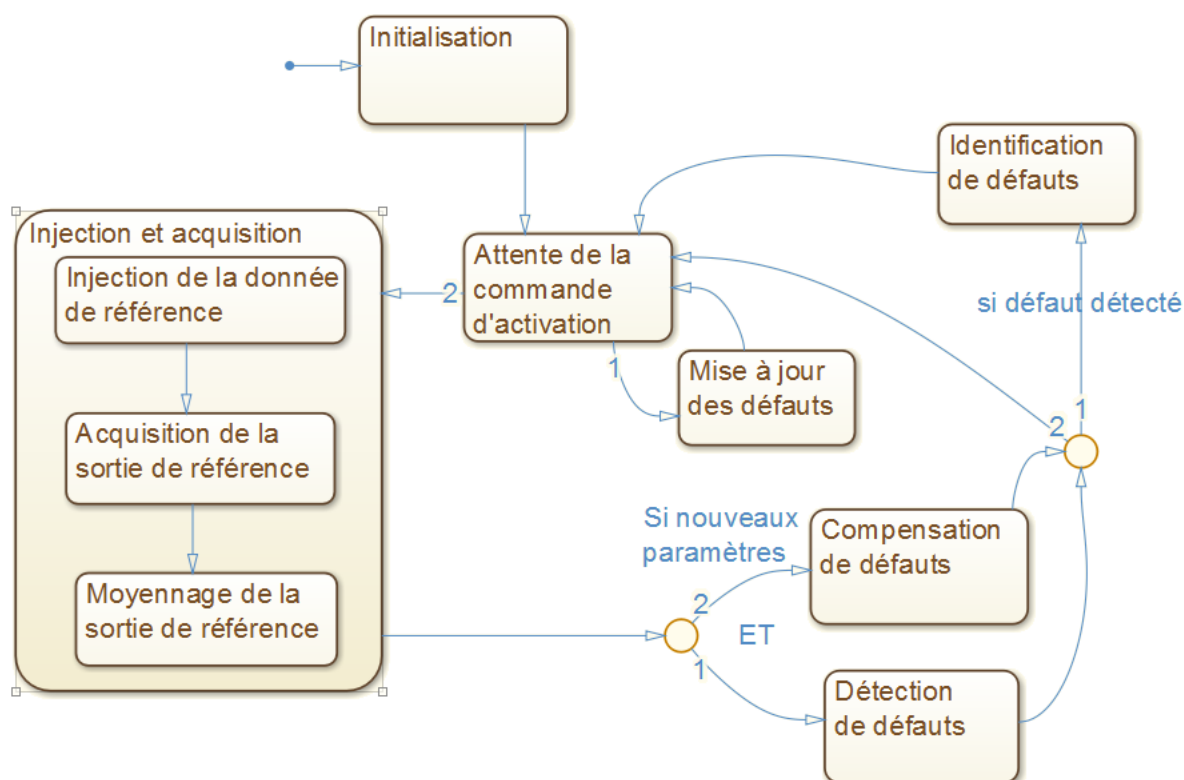


Figure IV-8. Machine d'états de la gestion des modes et du test

Dans ce diagramme, nous retrouvons en première étape la fonction générique d'initialisation du prototype et du Speedgoat. Puis de manière cyclique, nous pilotons une commande d'activation afin d'exécuter les différentes phases de fonctionnement de notre banc d'essais : injection et acquisition, détection et compensation, identification. Puis de revenir sur l'état d'attente de la commande, tout en prenant en compte la mise à jour des défauts.

B.2.3. Prototypages mis en œuvre

Le plan d'expérience que nous avons élaboré dissocie les tests des blocs fonctionnels par rapport à leur modèle mathématique respectifs, des tests des modes de fonctionnement et de la fonction de compensation. Le premier test se définit comme du prototypage *Hardware-in-the-Loop* (HIL) puisqu'il s'agit d'une technique de test visant à valider le comportement du prototype réel via l'injection de stimuli d'entrée prédéfinis. Le second test se définit comme du prototypage de contrôle rapide puisque dans ce cas précis, c'est la machine temps réel qui gère l'architecture. Ce type de tests vise à observer le comportement de l'ensemble de la CAC instrumentée (prototype et modes de fonctionnement) et de le comparer avec son CdCF.

- Prototypage Hardware-in-the-Loop (HIL)

La traduction la plus fidèle du prototypage H-I-L est le prototypage « matériel dans la boucle », il s'agit d'une méthode de simulation caractérisée par l'association de véritables composants, connectés à une partie temps-réel simulée. La Figure IV-9 illustre la mise en

œuvre du prototypage HIL pour la validation de chacun des blocs fonctionnels de la CAC instrumentée, puis pour la calibration de son modèle mathématique.

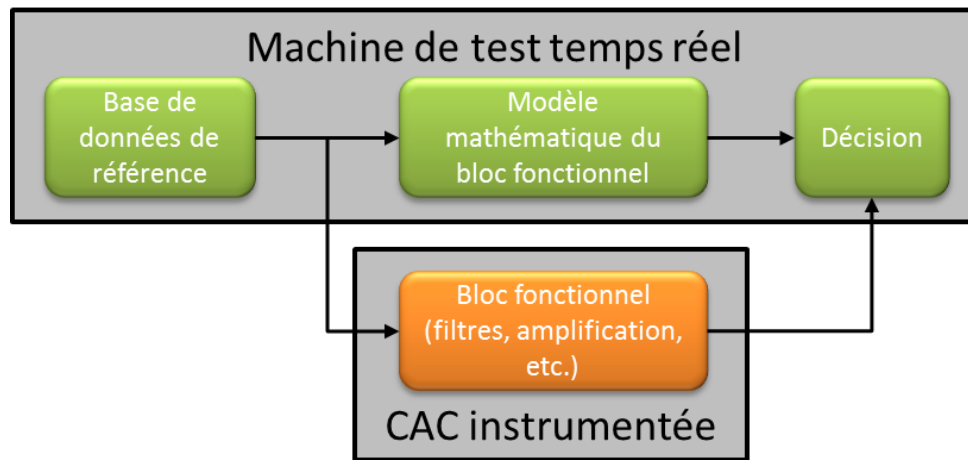


Figure IV-9. Schématisation du prototypage HIL

Dans le processus de validation du banc de test, le modèle mathématique correspond à chacun des étages de la CAC instrumentée, puis au cumul de ces étages jusqu'au test de l'ensemble de la CAC. Ainsi, pour valider l'ensemble de la CAC, il faut exécuter ce processus de test neuf fois : pour chacun des cinq blocs fonctionnels, puis en les cumulant à partir du pont de Wheatstone jusqu'à l'étage de conversion analogique-numérique).

- Prototypage de Contrôle Rapide (RCP)

Le prototypage de contrôle rapide est un processus de test d'algorithme et de programme de commande de système, qui vise à valider la stratégie développée. Ce processus intervient dans la phase descendante du cycle en V, au niveau de la conception des sous-systèmes. Dans notre cas, le prototypage de contrôle rapide nous permet d'évaluer le comportement des modes de fonctionnement, ainsi que des algorithmes génétiques déployés. La Figure IV-10 illustre la mise en œuvre du prototypage de contrôle rapide, nous pouvons observer une forte similarité avec le processus de détection de défaut présenté dans le chapitre 1, et issu de la littérature.

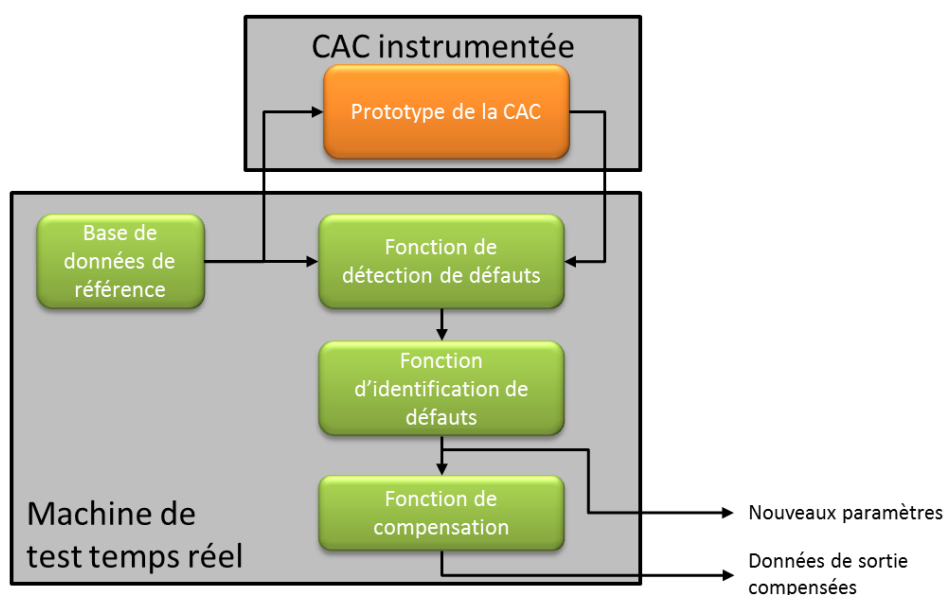


Figure IV-10. Schématisation du prototypage de contrôle rapide

Les deux techniques de prototypage présentées ici ont pour point commun la phase d'initialisation de la carte électronique. Cette initialisation vise à configurer matériellement la CAC instrumentée à travers la commande des commutateurs du pont de Wheatstone, ainsi que les différents potentiomètres numériques (pont de Wheatstone, résistance de gain, moyen d'injection de défauts). Le Tableau IV-2 classe l'utilisation des différents programmes en fonction du prototypage mis en œuvre.

Tableau IV-2. Exploitation des programmes en fonction du prototypage

Prototypages	Prototypage HIL	Prototypage de contrôle rapide
Initialisation de la CAC	Initialisation en fonction du ou des blocs fonctionnels à valider	Configuration de la CAC en mode détection de défauts : rebouclage sur le pont d'adaptation
Injection des données de référence	Jeu de données de référence en fonction du bloc fonctionnel à tester	Jeu de données de référence pour l'entrée du pont de Wheatstone
Récupération des sorties de référence	Acquisition des données de sortie du bloc fonctionnel testé	Acquisition des données en sortie du filtre simple
Moyenne des sorties de référence	Echantillonnage et moyenne des données analogiques acquises pour limiter l'impact des perturbations dues à la plateforme de test	
Acquisition des nouvelles valeurs des moyens d'injection de défauts	X	Mise à jour de la résistance de gain et des moyens d'injection de défauts
Détection de défauts	Pour la validation du bloc fonctionnel testé	Fonction du mode de détection de défauts
Identification de défauts	X	Algorithmes génétiques du mode d'identification de défauts
Compensation de défauts	X	Fonction de calcul de l'entrée compensée

B.3. Aperçu du banc de test

La Figure IV-11 illustre le montage du banc de test.

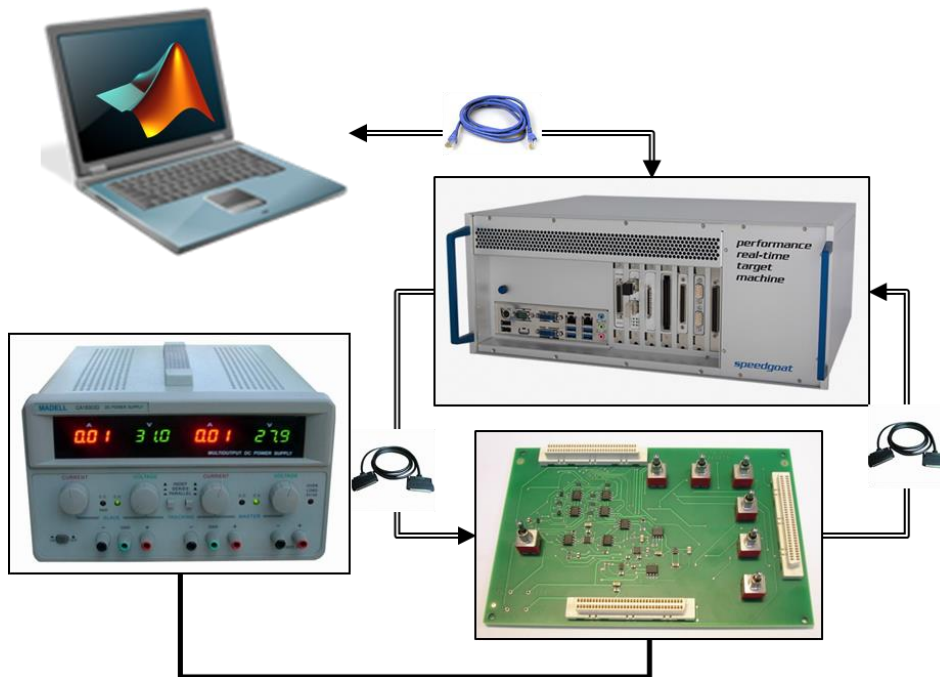


Figure IV-11. Aperçu du banc de test

Pour plus de détails sur la mise en place du banc de test, l'annexe *Table des entrées/sorties du banc d'essais* liste l'ensemble des entrées et des sorties de la machine de test temps réel.

C. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux présentent la pertinence des modes de fonctionnement et l'efficacité des fonctions implémentées. A partir d'un jeu de données de référence fixes et d'une évolution maîtrisée des défauts, nous analysons le comportement de la CAC en conséquence. Pour rappel, la CAC testée n'intègre pas l'étage de conversion analogique-numérique, ainsi que nous l'expliquons dans les perspectives de ce chapitre. De ce fait, nous avons intégré une fonction de moyenne basée sur 10 échantillons afin de réduire l'impact des incertitudes de mesure.

C.1. Signaux de test de la CAC instrumentée

Afin de réaliser l'expérimentation, la CAC est matériellement configurée en **mode détection de défauts**. C'est-à-dire qu'au lieu d'utiliser la sortie du capteur comme entrée de la CAC, des données de références sont injectées via la machine de test temps réel (le Speedgoat).

Le jeu de données de référence se compose des valeurs minimale et maximale de la pleine échelle de sortie du CAN tel qu'illustré dans la Figure III-29 du chapitre 3. Concrètement, ces valeurs de références sont de 0.1V et 0.9V en entrée de l'étage d'amplification.

Les défauts injectés sont les défauts de gain et d'offset de l'étage d'amplification. Afin de faciliter la compréhension des résultats, ceux-ci se comportent comme une évolution constante par paliers.

La **fonction de détection** de défaut se base sur un seuil fixe de $\pm 6\text{mV}$ tel que défini par nos spécifications techniques (et ça colle avec la figure de calcul d'écart en LSB pour un écart en température donné), c'est-à-dire que si le résidu issu du **mode de détection de défauts** franchit ce seuil, alors un défaut est détecté et le mode d'identification est enclenché. Ce seuil est plus large que pour un fonctionnement à conditions réelles, afin de réduire au mieux le taux de fausses alarmes lors de l'expérimentation.

La **fonction de décision** des algorithmes génétiques est calibrée de manière à ce que la précision de la mesure sur l'ensemble de la plage de donnée soit la même.

C.2. Validation du fonctionnement de la CAC instrumentée

Afin de mettre en avant l'impact de la précision de mesure sur la finesse de détection de défauts, nous avons injecté les données de références sur une échelle de temps de test fixe (40 secondes). De ce fait, la Figure IV-12 présente la précision de mesure de la sortie de la CAC instrumentée en fonction des deux valeurs de référence.

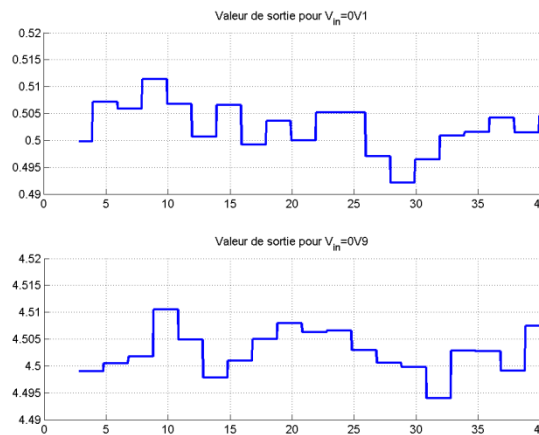


Figure IV-12. Valeurs des sorties de références

Les deux graphes de la Figure IV-12 correspondent à la valeur de sortie de la CAC instrumentée pour des données de référence en entrée respectivement de 0.1V (en haut) et 0.9V (en bas). La précision moyenne de mesure est de 3mV, ce résultat étant suffisant pour la suite des expérimentations. Cependant, il faudra prendre en compte cette légère imprécision et ses impacts sur la détection et l'identification des défauts. En effet, 3mV d'écart de précision pour la CAC instrumentée par rapport au modèle théorique induit au minimum le même écart lors du calcul de la sortie compensée.

C.3. Expérimentations avec injection des défauts

C.3.1. Expérimentation pour le défaut de gain

La première expérimentation est réalisée autour de la dérive du gain de l'étage d'amplification. Telle que présentée précédemment, la dérive du gain correspond à la modification de la valeur de la résistance R_g de l'étage d'amplification selon les équations IV-1 et IV-2.

- Evolution de la sortie et du défaut de gain

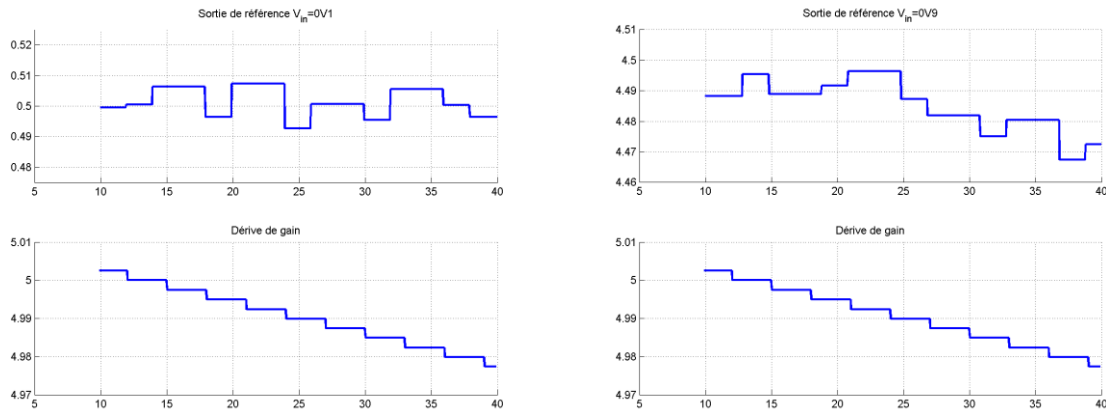


Figure IV-13. Sorties de référence pour la dérive de gain

Dans la Figure IV-13, le graphe en haut à gauche représente l'évolution de la sortie pour une donnée de référence de 0.1V. Le graphe en haut à droite représente l'évolution de la sortie pour une donnée de référence de 0.9V. Les deux graphes au-dessous correspondent à l'évolution du gain. Le graphe de gauche correspond à l'évolution de la sortie de référence pour une entrée faible tension n'est que faiblement impactée par la dérive injectée. Au contraire du graphe de droite, qui montre une tendance d'évolution identique à celle du gain.

- Comparaison des sorties mesurées et des sorties compensées

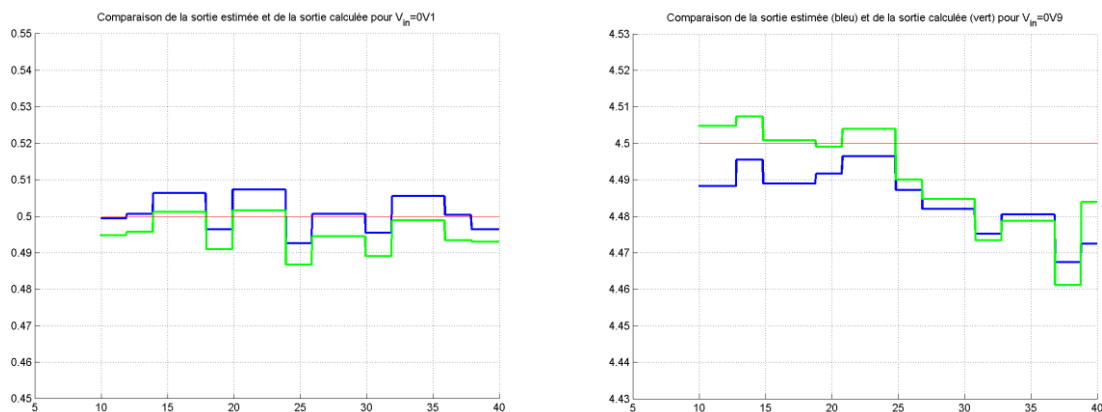


Figure IV-14. Comparaison des sorties estimées et des sorties calculées pour la dérive de gain

Le graphe de gauche, de la Figure IV-14 représente la sortie de référence pour une donnée d'entrée de 0.1V, tandis que le graphe de droite correspond au résultat issu de l'entrée à 0.9V. La constante (en rouge) correspond à la valeur théorique attendue de la sortie. La courbe bleue représente la sortie estimée, c'est-à-dire la sortie sans compensation de la CAC. La courbe verte correspond à la sortie compensée de la CAC.

Dans les deux cas, nous pouvons constater que l'évolution de la sortie recalculée corrobore avec l'évolution de la sortie estimée. De plus, dans le cas de la donnée de référence minimale ($V_{in}=0.1V$), la dérive du gain est la moins impactant.

Le graphe de droite permet de visualiser les moments auxquels l'écart entre les sorties estimée et compensée déclenche le mode d'identification des défauts. Ces écarts se situent à 7s et à 37s.

- Comparaison des paramètres avec dérive et recalculés

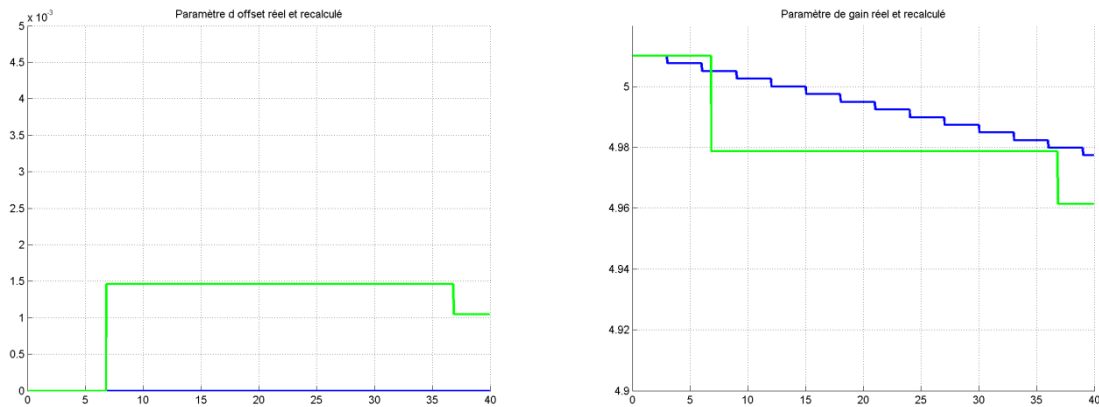


Figure IV-15. Comparaison de l'évolution des paramètres pour la dérive de gain

Les deux graphes de la Figure IV-15 représentent l'évolution des paramètres d'offset (à gauche) et de gain (à droite) de l'étage d'amplification. Les courbes en bleu correspondent à la valeur réelle du paramètre, incluant sa dérive commandée, tandis que les courbes vertes correspondent aux valeurs des paramètres recalculées par les algorithmes génétiques du mode d'identification des défauts. Cette figure peut s'interpréter de la manière suivante :

- A 3s : début de la dérive de gain
- A 7s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation
- A 37s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation

Nous pouvons constater que la détection, l'identification, et la compensation des défauts sont effectives, puisque la variation du gain dès le troisième palier de dérive enclenche le mode d'identification et de nouveaux paramètres sont recalculés. Le graphique de gauche montre également un recalcul de l'offset alors que celui-ci n'a pas été modifié. Ce phénomène est dû au caractère auto-adaptatif des algorithmes génétiques, ainsi qu'à la calibration de la fonction de décision qui permet et à la précision de sélection des couples de paramètres dans les algorithmes génétiques. Une précision de sélection des couples de paramètres plus fine permettrait d'améliorer l'efficacité d'identification, mais au détriment de la rapidité d'identification, voire augmenterait les risques de ne pas recalculer les nouveaux paramètres dans les délais impartis. Ce dernier point étant dû au caractère déterministe obligatoire de l'intégration de nos algorithmes génétiques.

C.3.2. Expérimentation pour le défaut d'offset

La seconde expérimentation cible l'impact de l'évolution de l'offset de l'étage d'amplification sur le fonctionnement de notre CAC.

- Evolution de la sortie et du défaut de gain

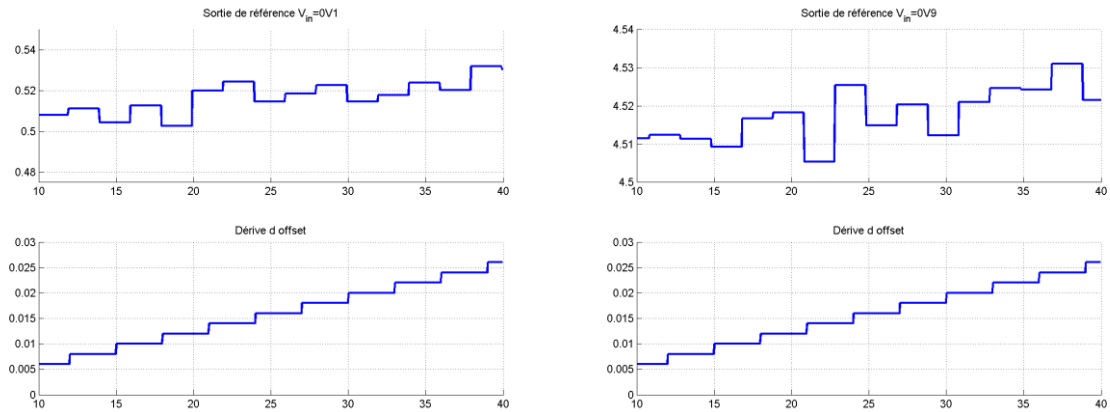


Figure IV-16. Sorties de référence pour la dérive d'offset

La Figure IV-16 présente la valeur de la sortie de référence en fonction de l'entrée injectée et de la dérive d'offset commandée. Le graphe de gauche illustre l'évolution de cette sortie pour une donnée de référence d'entrée de 0.1V, tandis que le graphe de droite représente son évolution pour une donnée de référence de 0.9V. Dans les deux cas, nous pouvons facilement reconnaître la tendance de la dérive d'offset à travers les valeurs de sorties qui tendent à augmenter de manière pratiquement identique. Ces comportements sont conformes à nos attentes.

- Comparaison des sorties mesurées et des sorties compensées

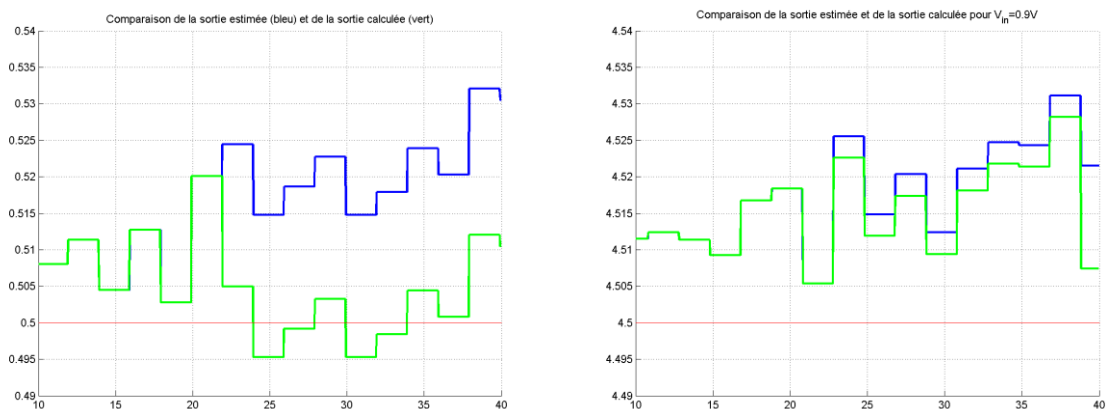


Figure IV-17. Comparaison des sorties estimées et des sorties calculées pour la dérive d'offset

Dans la Figure IV-17, les deux graphes correspondent à l'évolution de la sortie de référence, pour des données de référence précise, en fonction du temps et de la valeur de la dérive d'offset. Dans le graphe de gauche c'est la valeur minimale de 0.1V qui est représentée, et dans celui de droite il s'agit de la valeur maximale de 0.9V. La constante rouge correspond à la sortie théorique attendue lorsqu'il n'y a pas de défauts. Les courbes bleues représentent la sortie estimée, c'est-à-dire sans aucune modification. Les courbes vertes correspondent à la sortie compensée de la CAC. Ces graphes permettent d'identifier aisément le moment de la première détection de défauts, à 21s, lorsque la courbe verte (sortie compensée) se démarque de la courbe bleue (sortie estimée) et se rapproche de la courbe rouge (sortie idéale).

- Comparaison des paramètres avec dérive et recalculés

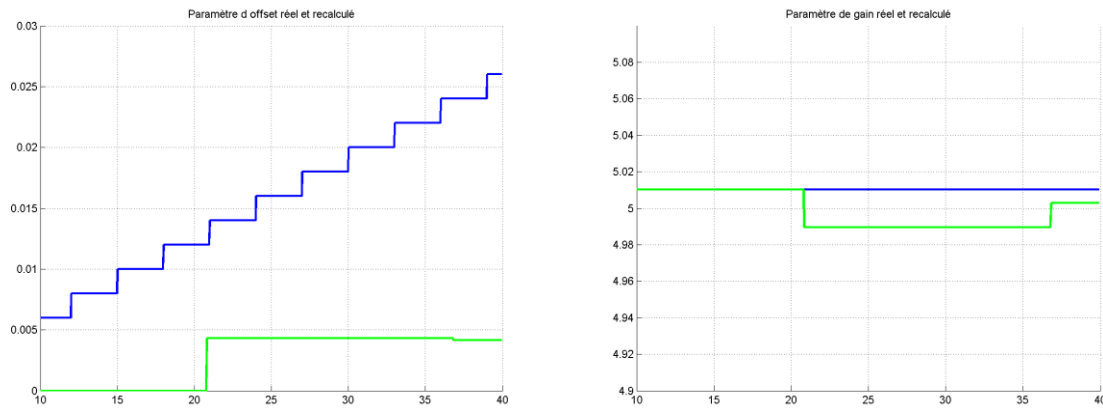


Figure IV-18. Comparaison de l'évolution des paramètres pour la dérive d'offset

Les graphes de la Figure IV-18 représentent l'évolution des paramètres d'offset (à gauche) et de gain (à droite). Les courbes bleues représentent la valeur réelle de l'offset et du gain, tandis que les courbes vertes correspondent aux valeurs recalculées de l'offset et du gain. Cette figure peut être interprétée de la manière suivante :

- A 3s, début de la dérive de l'offset
- A 22s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation
- A 37s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation

Nous pouvons constater que la détection, l'identification, et la compensation de défaut sont également effectives dans le cas d'une variation d'offset de l'étage d'amplification. A l'instar des graphes présentés en Figure IV-15, ceux de la Figure IV-18 présentent toujours le même phénomène de recalcul des deux paramètres, malgré l'évolution réelle d'un seul. Malgré ce fait, les résultats obtenus correspondent aux résultats attendus.

C.3.3. Expérimentation pour les défauts de gain et d'offset

La troisième expérimentation regroupe les dérives injectées de gain et d'offset présentées dans les deux expérimentations précédentes. L'idée étant d'améliorer un peu plus la représentativité de l'expérimentation par rapport à un fonctionnement réel. En effet, les dérives de gain et d'offset se développent en même temps, même si leurs valeurs ne sont pas liées entre elles.

- Evolution de la sortie et du défaut de gain

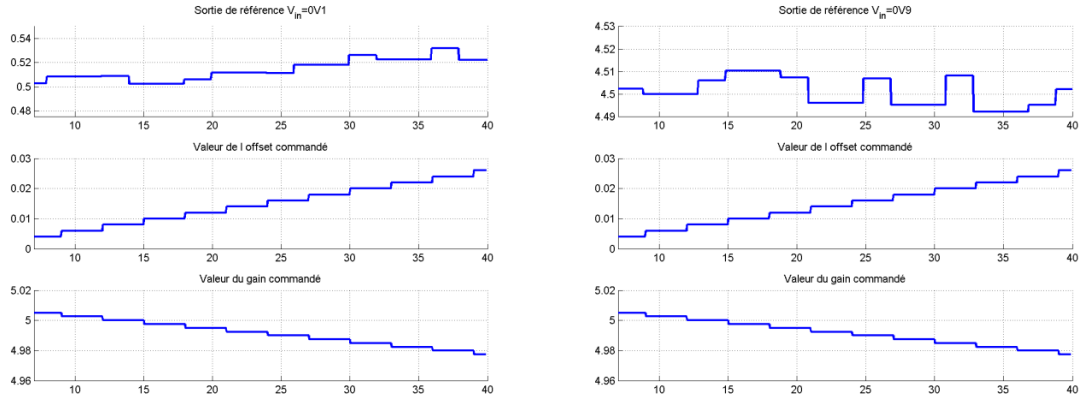


Figure IV-19. Sorties de référence pour les dérives de gain et d'offset

Les graphiques de la Figure IV-16, représentent la sortie de référence (sortie estimée) en fonction de l'évolution du gain et de l'offset de l'étage d'amplification. Le graphe de gauche correspond à une donnée de référence minimale de 0.1V, et le graphe de droite correspond à une donnée de référence maximale de 0.9V. Nous pouvons déjà constater les impacts de ces dérives sur le comportement de la CAC, malgré le fait que ces dérives se compensent partiellement. Dans le cas de la donnée de référence minimale, la dérive de l'offset est la plus flagrante. Dans le second cas, au contraire, la diminution du gain couvre l'augmentation de l'offset. Ces deux comportements correspondent avec les résultats attendus pour ce cas d'expérience.

- Comparaison des sorties mesurées et des sorties compensées

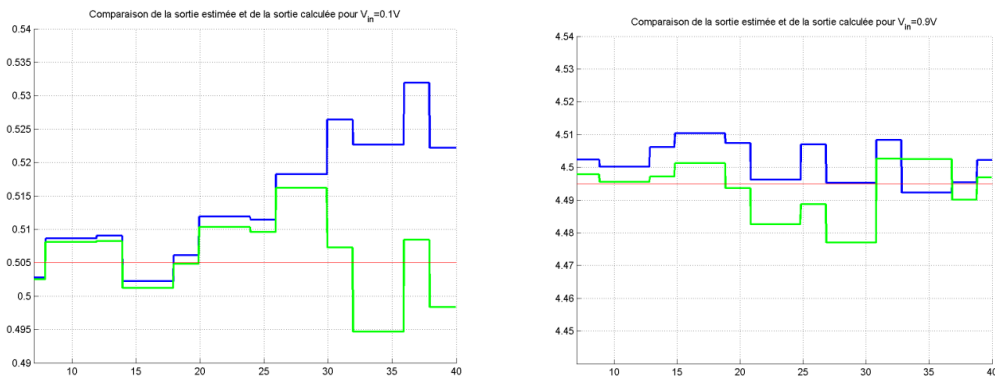


Figure IV-20. Comparaison des sorties estimées et des sorties calculées pour les dérives de gain et d'offset

Dans la Figure IV-20, les deux graphes correspondent à l'évolution de la sortie de référence, pour une donnée de référence précise, en fonction du temps et des dérives de gain et d'offset. Dans le graphe de gauche c'est la valeur minimale de 0.1V qui est représentée, et dans celui de droite il s'agit de la valeur maximale de 0.9V. La constante rouge correspond à la sortie théorique attendue lorsqu'il n'y a pas de défauts. Les courbes bleues représentent la sortie estimée, c'est-à-dire sans aucune modification. Les courbes vertes correspondent à la sortie compensée de la CAC. Dans ce cas d'expérience, malgré les mêmes comportements des dérives de gain et d'offset, nous pouvons constater que les défauts sont détectés plus tardivement. Ce phénomène est dû à l'impact des défauts qui se compensent partiellement.

- Comparaison des paramètres avec dérive et recalculés

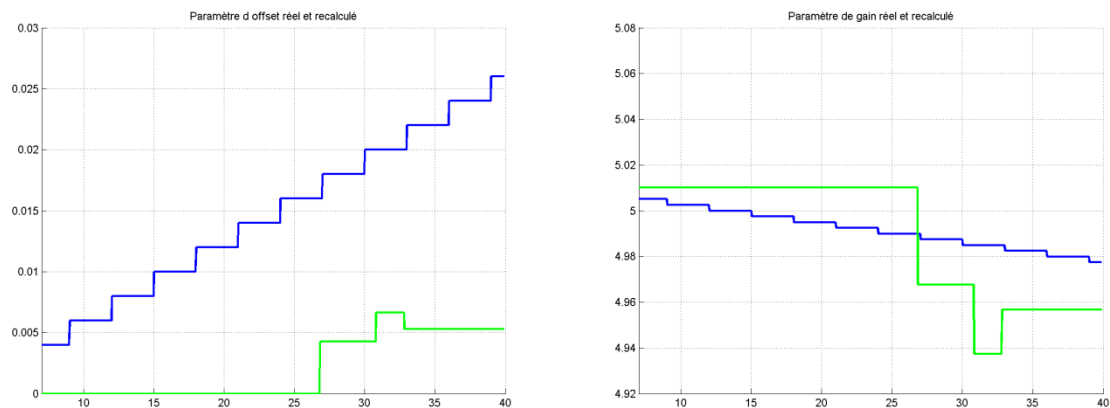


Figure IV-21. Comparaison de l'évolution des paramètres pour la dérive de gain et d'offset

Les graphes de la Figure IV-21 représentent l'évolution des paramètres d'offset (à gauche) et de gain (à droite). Les courbes bleues représentent la valeur réelle de l'offset et du gain, tandis que les courbes vertes correspondent aux valeurs recalculées de l'offset et du gain. Cette figure peut être interprétée de la manière suivante :

- A 3s, début des dérives de gain et d'offset
- A 27s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation
- A 31s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation
 - Cause : la précédente correction ne fut pas suffisante
- A 33s : nouveau défaut détecté, calcul des nouveaux paramètres, et compensation

Dans le dernier cas de détection ($t=33s$), nous pouvons en déduire que la compensation effectuée à l'étape précédente n'était pas suffisante au regard de la tendance d'évolution des défauts. Ce troisième cas d'expérience montre que les fonctions de détection, d'identification, et de compensation répondent correctement à l'évolution du gain et de l'offset de l'étage d'amplification.

C.4. Synthèse des résultats

L'expérimentation a démontré que notre CAC est fonctionnelle et qu'elle répond à nos attentes en termes de détection, d'identification, et de compensation des défauts surveillés. L'expérimentation montre également la pertinence de l'utilisation des algorithmes génétiques comme méthode d'identification. De plus, les résultats confortent également les aspects critiques de notre CAC, tels que:

- la précision d'acquisition pour la détection de défauts et le calcul des nouveaux paramètres,
- l'importance de la fonction de décision pour la sélection des nouveaux paramètres,
- le compromis entre la rapidité de détection et le taux de fausses alarmes,
- le compromis entre l'efficacité du calcul des nouveaux paramètres et les ressources de calcul nécessaire pour y parvenir.

Enfin, les résultats présentés lors de l'injection de multiples défauts en simultané, ainsi que l'illustre la **Figure IV-21**, rappellent la difficulté de détection des défauts multiples au sein d'un même système.

Cependant, les résultats illustrés par les Figure IV-15 et Figure IV-18 montrent également le risque de recalcul non nécessaire de certains paramètres. Ce phénomène est dû au caractère auto-adaptatif des algorithmes génétiques, ainsi qu'à la calibration de la fonction de décision et à la précision de sélection des couples de paramètres dans les algorithmes génétiques. Une précision de sélection des couples de paramètres plus fine permettrait d'améliorer l'efficacité d'identification, mais au détriment de la rapidité d'identification, voire augmenterait les risques de ne pas recalculer les nouveaux paramètres dans les délais impartis. Ce dernier point étant dû au caractère déterministe obligatoire de l'intégration de nos algorithmes génétiques. Malgré ce fait, les résultats obtenus correspondent aux résultats attendus.

D. Perspectives de développement du banc

Les résultats d'expérimentation présentés précédemment ont montré la pertinence de l'architecture de la CAC intégrant ses différents modes de fonctionnement. Cependant, pour des raisons relatives à l'intégration de la CAC instrumentée au sein du banc d'essais, nous n'avons pas encore pu intégrer le convertisseur analogique-numérique. Par conséquent, l'évaluation des besoins en ressources de calcul et espace de stockage n'ont pas pu être réalisés.

D.1. Travaux à court termes

La prochaine activité à suivre sera l'intégration complète de l'étage de conversion analogique-numérique au sein de la CAC instrumentée. Par la suite, nous pourrons réaliser l'estimation des besoins en ressources de calcul et de stockage de la gestion des modes et de l'utilisation des algorithmes génétiques comme méthode d'identification des défauts. Enfin, nous pourrons estimer le degré d'embarquabilité de l'ensemble des modes de fonctionnement et de la fonction de gestion au sein d'un microcontrôleur utilisé dans l'aéronautique, tel que le MPC5554.

D.2. Explications pour le CAN

A l'heure actuelle, l'étage de conversion analogique-numérique de nos deux cartes électroniques est hors d'usage. Cependant, nous sommes parvenus à faire fonctionner correctement ces blocs de conversion et valider le modèle mathématique, durant un moment.

Actuellement, le modèle mathématique de l'étage de conversion analogique-numérique a été validé en simulation et nécessite d'être validé par expérimentation. Pour remplacer temporairement les CAN, nous utilisons les commutateurs inter-blocs pour rediriger le signal en sortie du filtre simple vers une entrée de la machine de test temps réel. C'est donc l'une des fonctions du Speedgoat qui remplace temporairement l'étage de conversion.

L'hypothèse la plus probable concernant la mise hors d'usage des convertisseurs analogique-numérique des deux cartes électroniques de test, est l'utilisation de la machine de test temps réel sans procédure spécifique, ni moyens de protection électriques supplémentaires. Nous sommes parvenus à cette conclusion après l'analyse des composants inutilisables. En effet, le pont de diode en entrée des deux convertisseurs est défectueux. Dans le cas du premier

prototype, il s'agit d'un court-circuit. Ce qui amène le composant à identifier la tension d'entrée comme la valeur pleine échelle dès que la tension d'entrée est supérieure à 0V. Le second prototype présente une dissymétrie du pont de diode en entrée. Ce qui a pour effet que le composant acquiert la tension à convertir comme une tension évoluant entre 80% et 100% de la valeur pleine échelle. Deux causes probantes de la panne sont :

- l'appel de courant sur le circuit du banc de test lors du démarrage de la machine (supérieur à 1 ampère)
- notre prototype ne supporte pas les valeurs de tension des sorties analogiques du Speedgoat non initialisé pendant une durée supérieure à quelques minutes

Par conséquent, nous avons mis en œuvre une procédure d'utilisation de la machine de test afin de s'assurer de ne pas endommager les autres composants de la CAC.

Par la suite, deux possibilités sont envisagées : le remplacement du composant défectueux directement sur le PCB de la CAC, ou l'implantation du convertisseur analogique-numérique sur un adaptateur sop-dip. Dans les deux cas, il est nécessaire de valider la procédure d'utilisation

E. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons validé par expérimentation la pertinence de notre nouvelle architecture de Chaîne d'Acquisition Capteur, ainsi que la sélection des fonctions de détection et d'identification de défauts.

Dans la première partie nous avons présenté le plan d'expérimentation ainsi que le processus de développement de l'ensemble du banc de test. Celui-ci qui regroupe la CAC instrumentée, la machine de test temps réel, et les programmes de test et ceux à valider.

Dans la seconde partie, nous avons présenté les résultats expérimentaux pour une CAC intégrant les éléments suivants : pont d'adaptation, pré-filtrage, amplification, filtrage. Ces résultats ont prouvés l'aptitude de notre CAC à détecter, identifier, et compenser les défauts injectés, jusqu'aux seuils de tolérance des composants que nous avons défini. Les résultats ont également mis en avant la pertinence de l'utilisation des modes de fonctionnement, ainsi que la sélection des algorithmes génétiques comme méthode d'identification des défauts. Les résultats ont rappelé la difficulté de détection de défauts multiples, notamment lorsque certains d'entre eux se compensent partiellement. De ce fait, la précision d'acquisition de la sortie de référence contribue largement à l'efficacité de la détection, par une calibration plus fine des seuils de détection. Heureusement, la fonction d'identification a démontré son efficacité pour l'identification des défauts, et la proposition de nouveaux paramètres plus proches des paramètres réels ayant dérivé. Nos résultats ont mis à jour l'importance de la calibration de la fonction de décision. L'efficacité de cette dernière contribue grandement au succès du mode d'identification. En effet, plus la fonction de décision est efficace, plus la compensation sera opérante sur les valeurs de sorties, ainsi l'intégrité de la CAC est mieux assurée. Enfin, les résultats ont pu confirmer l'importance des compromis suivants dans la conception et la calibration de notre CAC :

- la précision d'acquisition pour la détection de défauts et le calcul des nouveaux paramètres,
- l'importance de la fonction de décision pour la sélection des nouveaux paramètres,

- le compromis entre la rapidité de détection et le taux de fausses alarmes,
- le compromis entre l'efficacité du calcul des nouveaux paramètres et les ressources de calcul nécessaire pour y parvenir.

La troisième partie de notre chapitre a donné un bref aperçu des travaux à mener par la suite dans l'idée de compléter les expérimentations déjà menées. Nous y avons également expliqués les causes de l'absence de l'étape de conversion analogique-numérique au sein des expérimentations.

Enfin, ce chapitre aura présenté l'importance des compromis de conception et de calibration de la CAC afin de la rendre plus tolérante aux défauts. De ce fait, la CAC est apte à fournir des valeurs de mesure plus intègres, tout en limitant l'impact sur la disponibilité de l'information à transmettre. Nous arrivons donc à la validation d'une architecture plus intégrée et plus intelligente, ce qui se trouve être en conformité avec les tendances techniques et technologiques présentées dans le chapitre 1.

Conclusion et perspectives

L'augmentation constante du trafic aérien ainsi que les tendances de conception de systèmes plus "verts" amènent à reconsidérer la conception des systèmes aéronautiques critiques. D'un côté, l'augmentation du trafic aérien pousse à revoir à la hausse leurs contraintes de sûreté de fonctionnement, les solutions actuellement déployées se basant très largement sur l'augmentation du nombre de redondances physiques. D'un autre côté, les tendances de conception de systèmes plus "verts", poussent à la réduction du volume, du poids et de la consommation énergétique des fonctions embarquées. Ces deux tendances majeures semblent clairement diverger, ce qui rend la conception de systèmes aéronautiques critiques nouveaux de plus en plus complexe.

Le travail présenté dans ce manuscrit, porte sur la conception d'une architecture plus robuste de chaîne d'acquisition capteur au sein de systèmes aéronautiques critiques. L'élaboration de notre nouvelle architecture se structure autour des contraintes inhérentes aux systèmes aéronautiques critiques, ainsi que des moyens applicables permettant de respecter ces contraintes:

- niveau de sûreté de fonctionnement,
- disponibilité de la Chaîne d'Acquisition Capteur,
- intégrité des données transmises
- non-intrusivité des fonctions supplémentaires.

Dans le premier chapitre, l'étude a d'abord introduit le contexte des systèmes aéronautiques critiques: leurs enjeux relatifs à leur criticité, et les solutions actuellement mises en œuvre pour y répondre. Puis, l'étude a porté sur la nature des chaînes d'acquisition capteur: leur caractérisation, et les solutions techniques et technologiques quel que soit le domaine d'utilisation. Enfin, nous avons présenté un état de l'art comparatif des moyens de détection, d'identification, et de diagnostic de défauts qui sont déjà utilisés dans divers domaines tels que l'automatique, la chimie, ou encore l'économie. Ce premier chapitre a permis de mettre en avant la complexité de conception de chaîne d'acquisition capteur critiques, mais également les solutions déjà existantes au sein d'applications beaucoup moins contraintes.

Dans les chapitres suivants, nous identifions pas à pas la méthodologie à mettre en œuvre pour développer une architecture plus robuste, et donc tolérante aux défauts. Enfin, nous étayons la pertinence de notre architecture par des simulations et des expérimentations en laboratoire.

Dans le second chapitre, nous avons élaboré notre nouvelle architecture de chaîne d'acquisition capteur, qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet [MAR 14]. La première étape a été de cibler un cas d'application type, à partir du cahier des charges fonctionnel du projet SYRENA. La seconde étape s'est orientée sur l'identification des défauts à surveiller de notre cas d'application, afin de rendre la CAC plus tolérante aux défauts. La troisième étape, s'est concentrée sur le développement de l'architecture à élaborer, en prenant en compte les contraintes de conception et les défauts à surveiller. La quatrième étape s'est axée autour du respect des contraintes de disponibilité et d'intégrité des données de mesure de la CAC, c'est ainsi que nous avons déroulé un ensemble de modes de fonctionnement génériques vis-à-vis des chaînes d'acquisition capteur. Enfin, la dernière étape a décrit un processus de sélection de méthode d'identification de défauts, basé sur un ensemble de critères de désirabilité issu à la

fois du domaine de l'automatique et de l'aéronautique critique. Ce chapitre a mis en avant la complexité de conception de systèmes hautement critiques à travers une liste de compromis de réalisation, ainsi que le besoin de surveiller les dérives paramétriques en sus des défauts francs.

Dans le troisième chapitre, l'étude a porté sur l'intégration de l'architecture et des modes de fonctionnement au sein de notre cas d'application. Etape par étape, nous avons modélisé, puis simulé, les fonctions de détection et d'identification de défauts, puis le module de gestion des modes de fonctionnement. Enfin, ce chapitre se termine par la modélisation de la représentation mathématique de notre chaîne d'acquisition capteur.

Dans le dernier chapitre, l'étude porte sur la mise en œuvre du banc d'essais dans l'optique de valider par expérimentation l'architecture qui a été conçue précédemment. Il a été démontré la pertinence des fonctions de détection et d'identification de défauts, et du rôle des modes de fonctionnement. D'abord, la détection des défauts est le moins intrusive possible grâce à l'aptitude de reconfiguration matérielle présentée. Puis, l'utilisation des algorithmes génétiques bornés comme moyen de suivi des dérives paramétrique a montré le potentiel de cette solution vis-à-vis de CAC plus complexes. Enfin, la fonction de compensation a prouvé son efficacité au regard des spécifications de test données.

En résumé, notre nouvelle architecture apporte de nouvelles aptitudes permettant d'assurer l'intégrité des données, la disponibilité de la CAC, et le niveau de sûreté de fonctionnement de l'ensemble à travers les apports suivants:

- Détection de défauts peu intrusive grâce à l'aptitude de reconfiguration matérielle
- Amélioration du taux de couverture des défauts : dérives paramétriques en supplément
- Fonction d'identification de défauts apte à la localisation, et donc au suivi des défauts
- Complément de la mesure estimée par la mesure compensée
- Indicateur du statut de confiance de la CAC
- Standardisation de la CAC dans son ensemble

Les travaux qui ont été réalisés présentent le double avantage de réunir les atouts de multiples domaines techniques (instrumentation, architecture, automatique) en une solution nouvelle, et l'opportunité de poursuivre les travaux en vue de les intégrer en tant que système de surveillance tel que le monitoring. De ce monitoring, il en découlerait l'aptitude de ces équipements avioniques à planifier leur propre maintenance et réduire ainsi les coûts opérationnels actuels de maintien en condition opérationnelle. Avec l'augmentation des contraintes de sûreté de fonctionnement des chaînes d'acquisition, la mise en œuvre de ce type d'architecture permettra de répondre à la fois aux problématiques de sûreté et de conception (SWaP).

A plus court terme, il serait judicieux d'intégrer le modèle mathématique et les modes de fonctionnement au sein d'un contrôleur certifié aéronautique, type MPC5554, afin d'estimer le degré d'embarquabilité de notre solution. Puis d'améliorer le fonctionnement de notre architecture par l'intégration d'un seuil de détection adaptatif, ainsi que l'optimisation de la fonction de décision. A moyen terme, l'idée est d'assurer la viabilité, d'un point de vue avionique, de notre solution afin d'assurer l'amélioration de son TRL. Ceci permettant de rendre notre CAC certifiable pour son utilisation dans l'avionique.

Bibliographie

- [AD 03] Analog Devices, "AD8221", document technique, 2003
- [AD 04] Analog Devices, "AD7685", document technique, 2004
- [AG 13] Agilent Technology, "Agilent Impedance Measurement Handbook - A guide to measurement technology and techniques", 4th edition, 2013
- [AI 12] Airbus, "Global Market Forecast 2012-2031", 2012
- [ALA 01] Alag S. et al., "A Methodology for Intelligent Sensor Measurement, Validation, Fusion, and Fault Detection for Equipment Monitoring and Diagnostics", 2001
- [AR 06] ARATEM, "Capteurs Autonomes: La rupture énergétique", Bourges 2006
- [ASC 06] Asch G. et coll., "Les capteurs en instrumentation industrielle", 2006
- [AVI 00] Avizienis A., J-C Laprie, and Randell B., "Dependability of computer systems: Fundamental concepts, terminology, and examples", Technical report, LAAS-CNRS, October 2000
- [AVI 01] Avižienis, Algirdas et al., "Fundamental Concepts of Dependability", Technical Report Series, 2001
- [BAK 11] Baker B., "A Glossary of Analog-to-Digital Specifications and Performance Characteristics", Texas Instruments, Application Report, 2011
- [BAL 06] Balageas D., "Structural Health Monitoring - Chap1: Introduction to Structural health Monitoring", 2006
- [BAS 93] Basseville M. et Nikiforov I.V., "Detection of Abrupt Changes : Theory and Application", ed. Prentice-Hall Inc., 1993
- [BAY 05] Bayart M. et al., "Capteurs et actionneurs intelligents", Techniques Ingénieurs, s7520, 2005
- [BEA 09] Beanato G., "Design of a Very Low Power SAR Analog to Digital Converter", Master Thesis, Université de Lausanne, 2009
- [BER 10] Bergougnoux L., "Conditionnement électronique des capteur"s, 2010
- [BHA 10] Bhatt D. et al., "Effective Verification of Flight Critical Software Systems Issues and Approaches", 2010
- [BHA 11] Bhatt, Devesh et al., Honeywell Aerospace Advanced Technology – "Effective Verification of Flight Critical Software Systems Issues and Approaches", Microsoft Research Workshop on Usable Verification, 2011
- [BLA 06] Blanke M. et al., "Diagnosis and Fault-Tolerant Control", 2006
- [BOL 08] Boller C. & MEYENDORF N., 2008, "State-of-the-Art in Structural Health Monitoring for Aeronautics", Proc. Of International Symposium on NDT in Aerospace, Fürth/Batavia, Germany, December 3-5, 2008

- [BOU 13] Bouanen S. et al. - "Fault Tolerant Smart Transducer Interfaces for Safety-Critical Avionics Applications", DASC, IEEE/AIAA 32nd, pp.2E4-1 2E4-13, East Syracuse, NY, USA, 2013
- [BRI 08] Brissaud F., "Capteurs Intelligents -- Nouvelles Technologies et Nouvelles Problématiques pour la Sûreté de Fonctionnement", extrait : "Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement", Lambda-Mu 16, 2008
- [CA 09] CATRENE, "Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems", 2009
- [CAO 99] CAO Y.J. and WU Q.H., "Teaching genetic algorithm using Matlab", Int. J. Elect. Enging Educ., vol 36, pp.139-153, Manchester U.P., 1999
- [CAS 96] Casas O. et al., "Basics of Analog Differential Filters", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol.45, No 1, 1996
- [CHA 01] Chambers L., "The Practical Handbook of Genetic Algorithms - Applications" 2nd Ed., Chapman&Hall/CRC, 2001
- [CLA 00] Clarke D.W., "Intelligent Instrumentation", Transaction of the Institute of Measurement and Control", 22, 1 pp.3-27, 2000
- [COR 09] Cory R., "RF Microwave Solid State Switches", Skywork Solution Inc., 2009
- [DAS 00] Dash S. and Venkatasubramanian, V., "Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems", Computers and Chemical Engineering 24, pp. 785 -791, 2000
- [DEF 10] Defour M. et col., "Avionique - Des technologies innovantes au service des plus belles réussites aéronautiques", Ed; Gallimard 2010
- [DIN 08] Ding S.X., "Model-based Fault Diagnosis Techniques – Design Schemes, Algorithms, and Tools", 2008
- [DRE 03] Dréo J et al., "Métaheuristiques pour l'optimisation difficile", Eyrolles, 2003
- [EC 13] European Commission, "Factsheet: Horizon 2020 budget", 2013
- [FAN 10] Fancy T., "Aircraft Electronics: Safety Assurance in Product Design/ Development/ Certification and Methods for Monitoring and Evaluating Safety Performance Aircraft Electronics", 2010
- [FLY 99] Flynn M.J., "Deep-SubMicron Microprocessor Design Issues", IEEE MICRO, 1999
- [GER 02] Gertler, Janos and Marcel Staroswiecki, "Structured fault diagnosis in mildly nonlinear systems: parity space and input-output formulations", in Preprints of the 15th IFAC World Congress, 2002
- [GON 13] Gonzales C. et al, "Transformer-Coupled Converter for Voltage Modulation Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, vol. 28, no 5, may 2013

- [GOU 11] Goupil P., "AIRBUS state of the art and practices on FDI and FTC in flight control system", *Control Engineering Practice* 19, pp. 524-539, 2011
- [GUS 00] Gustafsson F., "Adaptive Filtering and Change Detection", 2000
- [IE 04] IEEE Instrumentation and Measurement Society, "IEEE Standard for A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats", 2004
- [IF 10] IFSA, "Smart Sensors and Systems", *Sensors & Transducers*, Vol 114, Issue 3., ISSN 1726-5479, March 2010
- [ISE 05] Isermann, R., "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications", *Annual Reviews in Control* 29, pp71-85, Elsevier, 2005
- [ISE 06] Isermann, R. et al., "Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance", Springer-Verlag, 2006
- [ISE 97] Isermann, Rolf et al., 1997, "Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes", *Control Engineering Practice*, 5(5):709–719
- [KAT 05] S. Katipamula et M. R. Brambley, "Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review, Part I", *HVAC&R Research*, vol. 11, no. 1, 2005
- [KE 04] Keitley, 2004, "Low Level Measurements Handbook", 6th ed.
- [KHE 06] Kher S, et al., "IEEE 1451 standard and wireless sensor networks: An overview of fault tolerant algorithms", *IEEE Electro-Information technology EIT 2006*, May 7-8, 2006, East Lansing, MI, USA, pp.227-232
- [KO 10] KO J. et al, 2010, "Wireless Sensor Networks for Healthcare", *Proceedings of the IEEE*, vol98, No11, November 2010
- [LAP 85] Laprie Jean-Claude, "Dependable Computing and Fault Tolerance: Concepts and Terminology", *FTCS*, pp. 2-11, 1985
- [LAP 92] Laprie, Jean-Claude, "Dependability: Basic Concepts and Terminology", Springer-Verlag, 1992
- [LI 00] Li W., Yue H.H., Valle-Cervantes S., et S. J. Qin, "Recursive PCA for adaptive process monitoring", *Journal of Process Control*, vol. 10, no. 5, p. 471–486, 2000
- [MAR 11] Marzat Julien, "Diagnostic des systèmes aéronautiques et réglage automatique pour la comparaison de méthodes", *mémoire de thèse*, 2011
- [MAR 12] Marzat J. et al., "Model-based fault diagnosis for aerospace systems: a survey", *Proceedings ImechE vol 0 Part G*, SAGE, 2012
- [MAR 12a] Martin R. et al., " Process for Diagnosis Method Selection of Flight Critical Systems", *IEEE. Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012 IEEE/AIAA 31st*, Williamsburg, United States. pp.6E2-1 - 6E2-14, Oct 2012

- [MAR 12b] Martin R. et al, "Process for Diagnosis Method Classification in Avionics Critical Systems - Application to a Sensor Acquisition Systems", *More Electronic Aircraft - MEA 2012*, Bordeaux, France, Novembre 2012
- [MAR 13] Martin R. et al., "Performance Estimation of a FDI Function for Flight Critical Systems", IEEE. *Digital Avionics System Conference (DASC)*, 2013 *IEEE/AIAA 32nd*, Syracuse, United States. pp.4C2-1 - 4C2-11, Oct 2013
- [MAR 14] Martin R. et al., "Architecture de chaîne d'acquisition de grandeurs physique intégrant un moyen de détection et d'isolation de défaut" (brevets 1401272 et 1401273)
- [MIL 87] Milne R., "Strategies for Diagnosis", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. SMC-17, no. 3, may/june 1987
- [MIT 98] Mitchell M., "An introduction to genetic algorithms", 1998
- [MOR 05] Mortureux Y., "La sûreté de fonctionnement: méthodes pour maîtriser les risques", ref BM5008 - *Techniques de l'ingénieur*, 2005
- [MOR 11] Morel M. and Chauvet J-D, 2011 "Safety Training", 2011
- [MUK 08] Mukhopadhyay S.C and Gupta G.S, "Smart Sensors and Sensing Technology", *Lecture notes in electrical engineering* 20, Springer, 2008
- [NEW 95] Newman G.A. and Alumbaugh D.L., " Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences ", *Journal Geophysical Prospecting*, vol43, No8, pp.1021-1042, November 1995
- [NI 05] NI, "An Overview of IEEE 1451.4 Transducer Electronic Data Sheets (TEDS)", 2005
- [NOR 04] Normand E., "Single Event Effects In Avionics And On The Ground", *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol14, issue2, 2004
- [OLA 06] Olariu S. et al., "Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications", Chapman & Hall/CRC, 2006
- [OLI 11] Oliviera L.M.L. and Rodrigues J.P.C., " Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring", *Journal of communications*, vol6, No2, April 2011
- [PAE 05] Paek J. et al., "The Performance of a Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring", 2005
- [PAT 94] Patton, et al., "Fault diagnosis in nonlinear dynamic systems via neural networks", *International Conference on Control*, Volume 2, Coventry, pp. 1346-1351, 1994
- [QUA 10] Quan R., Quan S., Huang L., et Xie C., " Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for Multi-Sensor of Fuel Cell System Using Two-level Neural Networks ", *Journal of Computational Information Systems*, vol. 6, no. 11, p. 3703–3711, 2010
- [RAN 04] Randy L.H. and Sue E.H, "Practical Genetic Algorithms", 2nd ed., WILEY, 2004

- [RT 06] RTCA Incorporation DO254, "Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware"
- [RT 07] RTCA Incorporation DO-160F, "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", 2007
- [RT 92] RTCA Incorporation DO-178B, "Software considerations in airborne systems and equipment certification", 1992
- [RT 97] RTCA Incorporation DO-160F, "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", 2007
- [RT xx] RTCA Incorporation DO254, "Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware"
- [RUM 04] Rumelhard C., " MMIC – Déphaseurs et amplificateurs ", Dossier techniques de l'ingénieur, 2004
- [SA 96] SAE Aerospace, 1996-2010, ARP4754 "Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems", 2010
- [SA 96] SAE Aerospace, "Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment", 1996
- [STA 04] Staszewski W., "Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing", EADS, ISBN 0-470-84340-3, 2004
- [STE 05] Steinberg M., "Historical overview of research in reconfigurable flight control", Naval Air Systems Command, Patuxent River, Maryland 20670, USA, ed. SAGE, 2005
- [TI 05] Texas Instrument, "TS5A3166 0.9 SPST analog switch", spécifications techniques, 2005
- [TOL 05] Nandi S., Toliyat H.A., Li X., "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review ", Energy Conversion, IEEE Transactions on (Volume:20 , Issue: 4), pp.719 – 729, Dec. 2005
- [VAN 25] Van Dusen M. S., "Platinum-Resistance Thermometry at Low Temperatures", volume 47, pp326, 1925
- [VAZ 10] Vazquez J.C. et al., "Programmable Aging Sensor Automotive Safety-Critical Applications", DATE, 2010
- [VEH 99] Vehus T., "Introduction to FMEA in Avionics", 1999
- [VEN 02a] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., and Kavuri S.N., "A Review of Process fault detection and diagnosis - Part I: Quantitative model-based methods", Computers and Chemical Engineering 27 (2003), pp.293-311, 2002
- [VEN 02b] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., and Kavuri S.N., "A review of process fault detection and diagnosis - Part II -- Qualitative models and search strategies", Computers & chemical engineering, vol. 27, p. 313–326, 2002

- [VEN 03] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., and Kavuri S.N., "A review of process fault detection and diagnosis:: Part III: Process history based methods", *Computers & chemical engineering*, vol. 27, no. 3, p. 327–346, 2003
- [VES 13] Vesely B. (NASA HQ), "Fault Tree Analysis (FTA): Concepts and Applications", 2013
- [WIL 05] Wilson J.S., "Sensor Technology Handbook", Elsevier, 2005
- [XIE 04] Xie J. and Pecht M., "Applications of in-situ Health-Monitoring and Prognostic Sensors", *Pan Pacific Microelectronics Symposium Exhibits and Conference*, Kahuku, Oahu, Hawaii, 10-12 February 2004
- [YUR 03] Yurish S.Y. and Gomes M., "Smart Snesors and MEMS", *Proc. Of the NATO Advanced Study Institute on Smart Sensors and MEMS*, Povia de Varzim, Portugal 8-19 Spetember 2003
- [YUR 10] Yurish S.Y., "Sensors: Smartvs. Intelligent", *Sensors & Transducers Journl*, Vol 114, Issue 3, pp. I-IV, 2010
- [ZWI 95] Zwingelstein G., "Diagnostic des défaillances théorie et pratique pour les systèmes industriels", Hermès, ISBN 2-86601-463-4, 1995

Annexes

A. Détail des concepts de maintenance

La **maintenance** se résume à l'ensemble des « activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ». [ZWI 95] Il s'agit de l'un des moyens mis en place pour assurer la phase d'exploitation du système, elle se compose de la **maintenance préventive** et de la **maintenance corrective**. La figure ci-dessous illustre les différents concepts de maintenance, à l'heure actuelle la maintenance systématique est la plus courante.

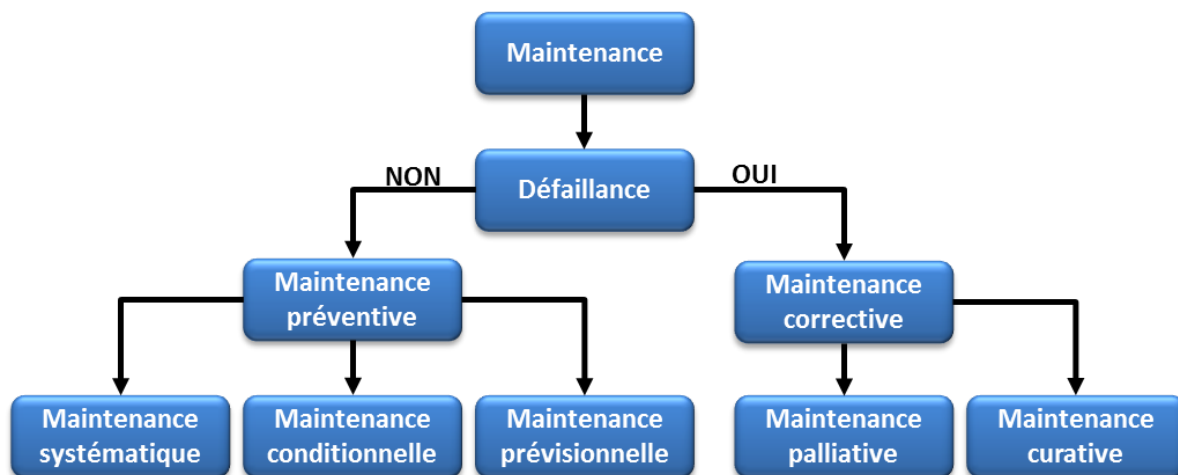


Figure V-1. Diagramme des différents concepts de maintenance [ZWI 95]

Maintenance préventive :

« Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien et/ou du service (maintenance conditionnelle) »

Maintenance préventive systématique : « Ce type de maintenance comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants, lorsque ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant »

Maintenance préventive conditionnelle : « Ce type de maintenance comprend toutes les tâches de restauration de matériels ou de composants non défaillances, entreprises en application d'une évaluation d'état et de la comparaison avec un critère d'acceptation préétabli (défaillance potentielle) »

Maintenance prévisionnelle : « Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions »

Maintenance corrective

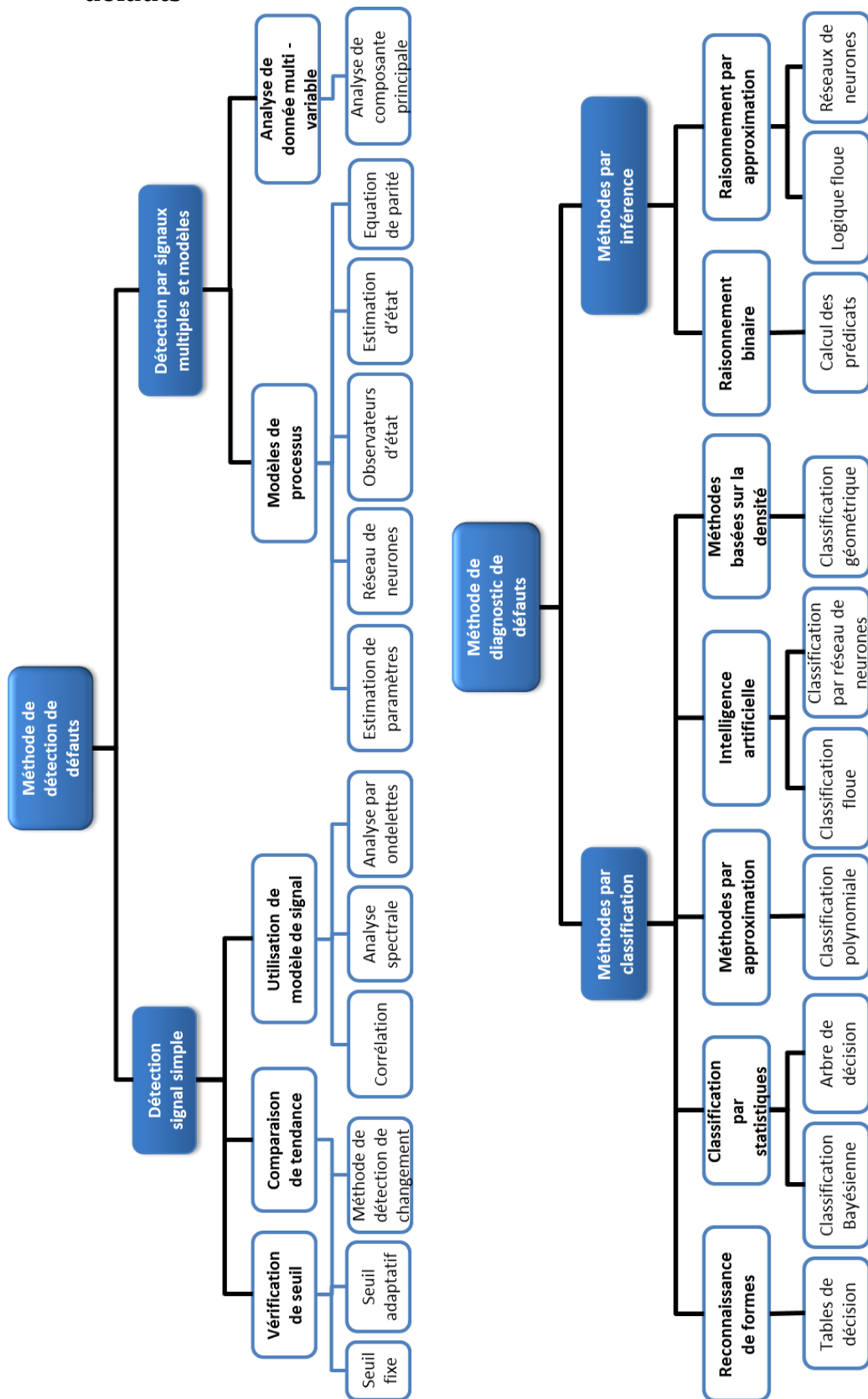
« Ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement: ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement »

Maintenance palliative: « Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives »

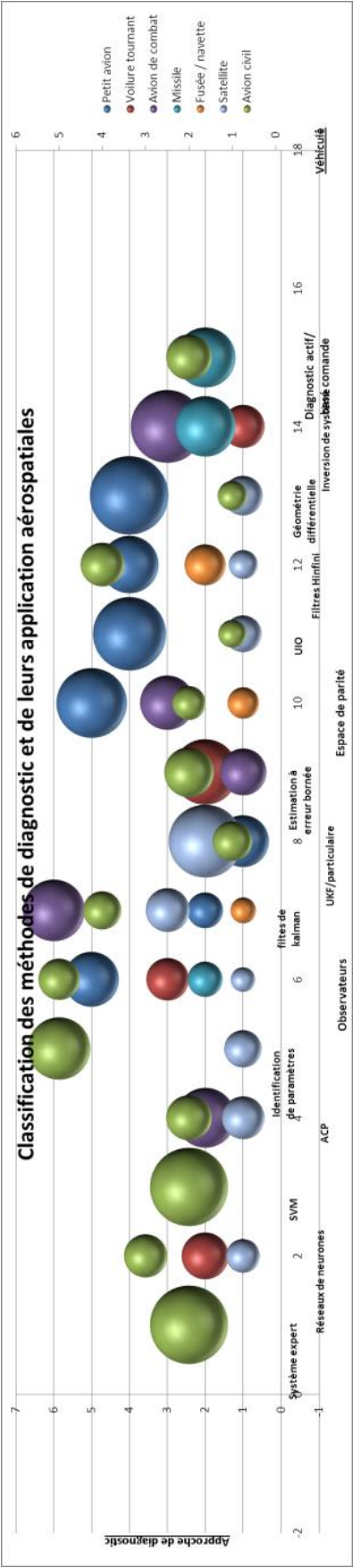
Maintenance curative: « Activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagements ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s). »

Source : Zwingelstein G., 1995, "Diagnostic des défaillances théorie et pratique pour les systèmes industriels", Hermès, ISBN 2-86601-463-4

A. Vue d'ensemble des méthodes de détection et de diagnostic de défauts



B. Classification de l'utilisation des méthodes de diagnostic [MAR11]



C. Architecture du convertisseur A/N de type SAR

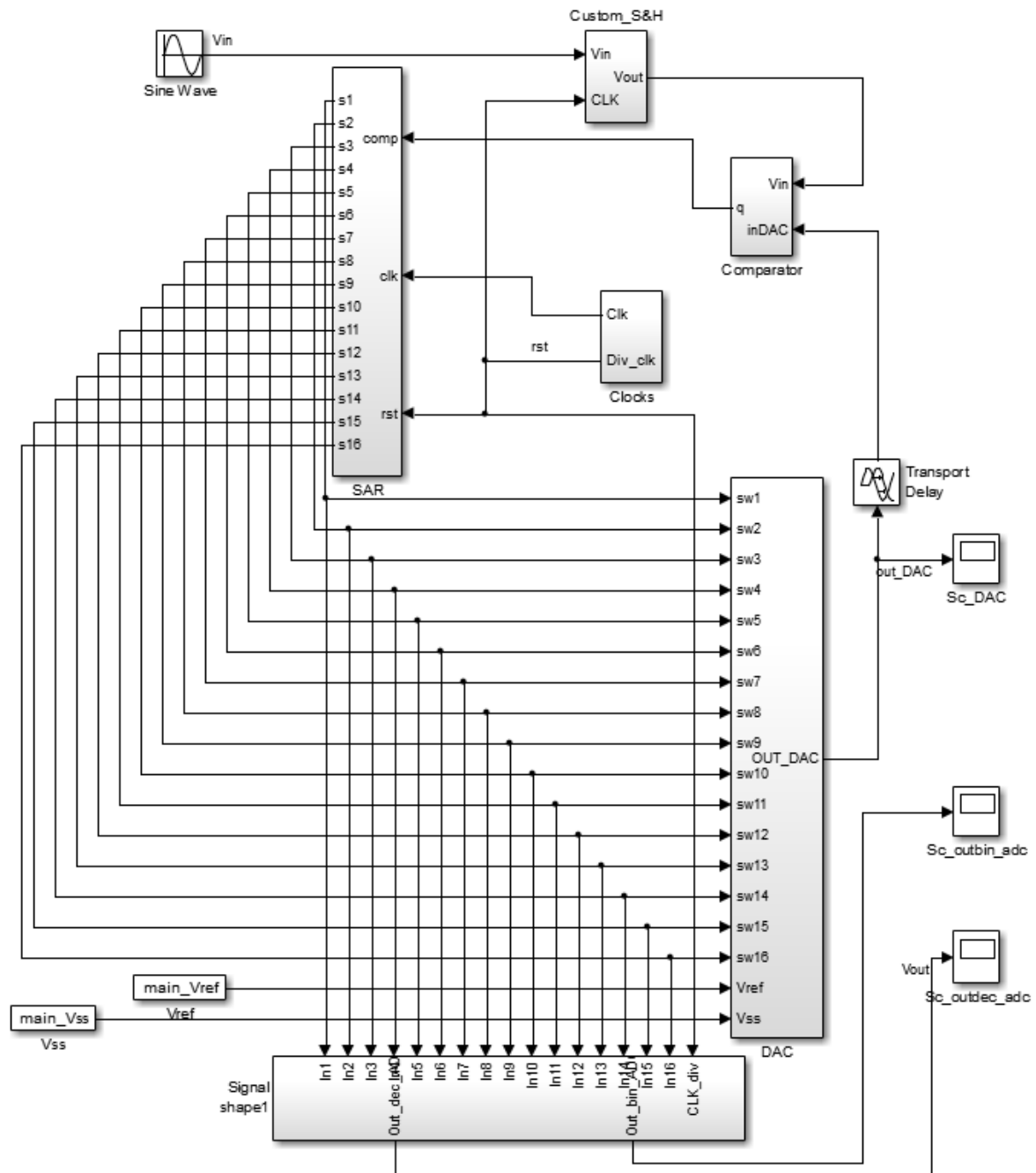


Figure V-2. Architecture du convertisseur analogique-numérique de type SAR

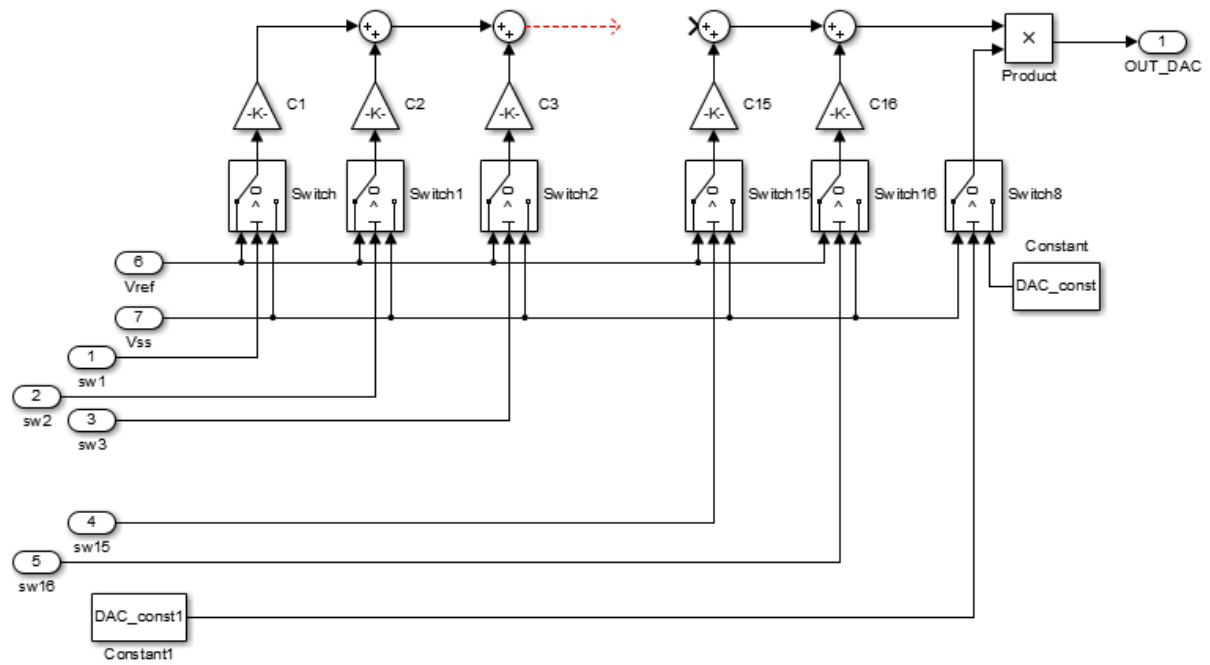


Figure V-3. Architecture de l'étage de conversion numérique-analogique

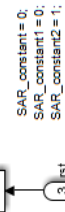


Figure V-4. Architecture de l'étage de conversion A/N par approximations successives

D. Table des entrées/sorties du banc d'essais

DESIGNATION	Input(I) - Output(O)	Analog(A) - TTL - SPI	Nature of Analog Signals	Description
Power supply				
pwr_12v	I	A	Voltage SE (+gnd)	board supply
Board main I/Os				
analog_in	I	A	Voltage SE (+gnd)	GBF... input
freq_in	I	A	Voltage SE (+gnd)	FPGA, GBF... input
dac_in	I	SPI	#####	SPI DAC input
adc_out	O	SPI	#####	SPI ADC output
Board secondary I/Os				
RTD_in	I	A	Voltage SE	RTD in
RTD_gnd	I	A	GND	RTD gnd
Mode set				
sw_mode	I	TTL	Voltage SE	switch autotest/sensor
Component simulating I/Os				
brdg_out+	O	A	Voltage Diff	wheatstone output +
brdg_out-	O	A		wheatstone output -
filter_in+	I	A	Voltage Diff	diff filter input +
filter_in-	I	A		diff filter input -
filter_out+	O	A	Voltage Diff	diff filter output +
filter_out-	O	A		diff filter output -
amp_in+	I	A	Voltage Diff	instr. amplifier input +
amp_in-	I	A		instr. amplifier input -
amp_out	O	A	Voltage SE (+gnd)	instr. amplifier output
lpf_in	I	A	Voltage SE (+gnd)	LPF input
lpf_out	O	A	Voltage SE (+gnd)	LPF output
adc_in	I	A	Voltage SE (+gnd)	ADC input

Resistors equivalent model command				
sc11		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R1
oc12		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R1
pot1		SPI	#####	potentiom. Cmd R1
sc21		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R2
oc22		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R2
pot2		SPI	#####	potentiom. Cmd R2
sc31		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R3
oc32		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R3
pot3		SPI	#####	potentiom. Cmd R3
sc41		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R4
oc42		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R4
pot4		SPI	#####	potentiom. Cmd R4
sc51		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R5
oc52		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R5
pot5		SPI	#####	potentiom. Cmd R5
scRTD1		TTL	Voltage SE	switch short-circuit RTD
ocRTD2		TTL	Voltage SE	switch open-circuit RTD
potRTD		SPI	#####	potentiom. Cmd RTD
sc61		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R6
oc62		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R6
pot6		SPI	#####	potentiom. Cmd R6
scC11		TTL	Voltage SE	switch short-circuit C1
ocC12		TTL	Voltage SE	switch open-circuit C1
sc71		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R7
oc72		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R7
pot7		SPI	#####	potentiom. Cmd R7
scC21		TTL	Voltage SE	switch short-circuit C2
ocC22		TTL	Voltage SE	switch open-circuit C2
scg1		TTL	Voltage SE	switch short-circuit Rg
ocg2		TTL	Voltage SE	switch open-circuit Rg
potg		SPI	#####	potentiom. Cmd Rg
sc81		TTL	Voltage SE	switch short-circuit R8
oc82		TTL	Voltage SE	switch open-circuit R8
pot8		SPI	#####	potentiom. Cmd R8
scC31		TTL	Voltage SE	switch short-circuit C3
ocC32		TTL	Voltage SE	switch open-circuit C3